



DIPLOMARBEIT

Andreas Hackner

**Ermittlung eines kalibrierten,
mathematisch physikalischen
Modells zur Absiebung von
verunreinigtem Gleisschotter
mittels Linearschwingsieb**

2012

DIPLOMARBEIT

Ermittlung eines kalibrierten, mathematisch physikalischen Modells zur Absiebung von verunreinigtem Gleisschotter mittels Linearschwingsieb

Autor:

Ing. Andreas Hackner

Studiengang:

Maschinenbau

Seminargruppe:

KM08wMVA

Erstprüfer:

Prof. Dr. Siegmund Ziller

Zweitprüfer:

Dr. Dipl.-Ing. Bernhard Lichtberger

Einreichung:

Mittweida, 24.07.2012

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2012

Bibliographische Beschreibung:

Hackner, Andreas:

Ermittlung eines kalibrierten, mathematisch physikalischen Modells zur Absiebung von verunreinigtem Gleisschotter mittels Linearschwingsieb. – 2012. – 81 S. Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau, Diplomarbeit, 2012

Referat:

Ziel der Diplomarbeit ist es, für eine typische Kornzusammensetzung im verunreinigten Gleisbett den Rückgewinn an gebrauchsfähigem Gleisschotter anhand eines Siebmodells darzustellen. Im ersten Teil der Arbeit wird auf die Gleisschotterreinigung und die Grundlagen der Siebklassierung eingegangen. Danach wird ein Modell konzipiert, anhand dessen sich der Siebprozess darstellen lässt. Die Ergebnisse werden mit praktischen Untersuchungsergebnissen verglichen und die Anwendbarkeit des Siebmodells wird bewertet.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Formelzeichenverzeichnis.....	VI
1 Einleitung.....	1
2 Ziele.....	3
3 Allgemeines zur Gleisschotterreinigung	5
3.1 Warum Reinigung des Gleisschotters	5
3.2 Anforderungen an den Oberbauschotter.....	8
3.2.1 Anforderungen an das Rohgestein	8
3.2.2 Technische Lieferbedingungen	9
3.3 Leistung von Reinigungsmaschinen	12
4 Grundlagen der Siebklassierung.....	16
4.1 Theorie des Siebens	18
4.1.1 Siebgutbewegung und Kennziffern	19
4.1.2 Durchgangswahrscheinlichkeit.....	25
4.2 Einflussgrößen beim Siebvorgang auf Wurfsiebmaschinen	27
4.2.1 Einflüsse des Siebguts.....	27
4.2.2 Einflüsse maschinentechnischer Parameter	28
4.2.3 Trennflächenparameter.....	29
4.2.4 Betriebsbedingungen	29
4.3 Kinetische Modelle der Siebung.....	29
4.3.1 Sieben als Reaktion 1.Ordnung	30
4.3.2 Sieben als Markovscher Prozess.....	31
4.4 Dimensionsanalytische Behandlung des Siebvorgangs.....	33
5 Wurfsiebe.....	35
5.1 Kreisschwinger.....	36
5.2 Linearschwinger.....	38
5.3 Siebböden.....	41
6 Grundmodell für den Siebvorgang	46
6.1 Aufbau.....	46

6.2	Kenndaten.....	47
6.2.1	Maschenweite	47
6.2.2	Siebbodenneigung	48
6.2.3	Wurfwinkel	48
7	Praktische Untersuchungsergebnisse.....	49
8	Berechnung und Kalibration des Modells	51
8.1	Berechnungsansatz	51
8.2	Vorgehensweise für die Berechnung des Modells	55
8.3	Ausgangsdaten für die Berechnung.....	56
8.4	Ermittlung der Materialmenge am Sieb	58
8.5	Berechnung der einzelnen Siebdecks.....	63
8.5.1	Berechnung Siebdeck 1	66
8.5.2	Berechnung Siebdeck 2	69
8.5.3	Berechnung Siebdeck 3	70
9	Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse	72
9.1	Ergebnisse des Berechnungsmodells	72
9.2	Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit dem Berechnungsmodell ..	74
9.3	Analyse der Abweichungen.....	76
10	Fazit und Ausblick	78
10.1	Anwendbarkeit des Modells	78
10.2	Möglichkeiten der Weiterentwicklung	79
	Literaturverzeichnis	80
	Anhang I: Siebuntersuchungsprotokoll.....	A1
	Anhang II: Übersicht Materialmenge - Aufgabeleistung	A4
	Anhang III: Berechnete Werte - Siebdeck 1	A5
	Anhang IV: Berechnete Werte - Siebdeck 2	A13
	Anhang V: Berechnete Werte - Siebdeck 3	A21
	Selbstständigkeitserklärung	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bettungsreinigungsmaschine RM80	1
Abbildung 2: Aufbau und Funktion eines 3-lagigen Siebes.....	2
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Siebparameter.....	3
Abbildung 4: Verunreinigtes Schotterbett	6
Abbildung 5: Ungünstige Druckverteilung auf dem Planum	7
Abbildung 6: Zulässiger Bereich der Lieferkörnung 31,5/63 mm	11
Abbildung 7: Förderleistung und Kettenverschleißkurve.....	12
Abbildung 8: Hochleistungsreinigungsmaschine RMW 1500.....	13
Abbildung 9: Qualitativer Zusammenhang zwischen Durchsatz, Rückgewinn und Siebqualität.....	14
Abbildung 10: Bettungsreinigungsmaschine mit 3 Siebanlagen.....	15
Abbildung 11: Vergleich der Partikeln des Aufgabeguts mit der Maschenweite	16
Abbildung 12: Schematischer Siebprozess	17
Abbildung 13: Einteilung der Ausrüstungen zum Siebklassieren nach der Siebgutbewegung	19
Abbildung 14: Wirkende Beschleunigungen und Abwurfverhältnisse.....	21
Abbildung 15: Bewegungsverhältnisse auf Kreis- und Linearschwingern	22
Abbildung 16: Wurfbahn eines Kornes in Abhängigkeit von der Siebkennziffer ..	23
Abbildung 17: Durchgangswahrscheinlichkeit für ungehindertes Passieren bei senkrechtem Auftreffen	26
Abbildung 18: Anzahl notwendiger Würfe und Durchgangswahrscheinlichkeit.....	26
Abbildung 19: Bewegung der Teilchen durch die Gutschicht	32
Abbildung 20: Verschiedene Typen von Wurfsieben.....	35
Abbildung 21: Kreisschwingsiebe, schematisch.....	36
Abbildung 22: Prinzip eines Exzentrerschwingsiebes	36
Abbildung 23: Prinzip eines Kreiswuchtschwingsiebes	37
Abbildung 24: Linearschwingsiebe, schematisch	39
Abbildung 25: Linearschwinger - Doppelunwuchtprinzip.....	40
Abbildung 26: Formen von Sieböffnungen	42
Abbildung 27: Durchgangsquerschnitte	43
Abbildung 28: Übersicht verschiedener Siebbodenarten	44
Abbildung 29: 3D-Schnitt durch ein Doppelwuchtschwingsieb.....	46

Abbildung 30: Querschnitte Profildraht.....	47
Abbildung 31: Wurfwinkeleinstellung.....	48
Abbildung 32: Auflockerungskennziffer in Abhängigkeit der Siebkennziffer	54
Abbildung 33: Unterteilung der Sieblänge in Abschnitte	55
Abbildung 34: Effektive Maschenweite.....	57
Abbildung 35: Aufgabemengenverteilung am Sieb	59
Abbildung 36: Auftreffwinkel in Abhängigkeit vom Ablösewinkel.....	60
Abbildung 37: Siebdeck 1 - Verlauf des Siebdurchgangs	68
Abbildung 38: Siebdeck 1 - Verlauf der Schichthöhe	68
Abbildung 39: Siebdeck 2 - Verlauf des Siebdurchgangs	69
Abbildung 40: Siebdeck 2 - Verlauf der Schichthöhe	70
Abbildung 41: Siebdeck 3 - Verlauf des Siebdurchgangs	71
Abbildung 42: Siebdeck 3 - Verlauf der Schichthöhe	71
Abbildung 43: Massenströme am Berechnungsmodell	72
Abbildung 44: Siebkurve des gereinigten Schotter.....	74
Abbildung 45: Summenkurve der Massenanteile - gereinigter Schotter.....	76
Abbildung 46: Summenkurve der Massenanteile – Bettungsrückstand	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Lieferkörnung	10
Tabelle 2: Zusammenhang Siebkennzahl und Siebwirkung.....	24
Tabelle 3: Kornzusammensetzung des gereinigten Schotters	49
Tabelle 4: Kornzusammensetzung der Bettungsrückstände	50
Tabelle 5: Kornzusammensetzung des ungereinigten Schotters	50
Tabelle 6: Übersicht Siebdaten	57
Tabelle 7: Kornzusammensetzung der Siebaufgabe.....	63
Tabelle 8: Ermittlung der Siebkonstante k_L für die Siebfraktion <8mm.....	67
Tabelle 9: Kornzusammensetzung des gereinigten Schotters und des Bettungsrückstands (Berechnung)	73
Tabelle 10: Gereinigter Schotter (Messung - Berechnung)	75
Tabelle 11: Bettungsrückstand (Messung - Berechnung)	75

Formelzeichenverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	m/s^2	Beschleunigung
a_n	m/s^2	Normalkomponente der Beschleunigung
A_0	-	Relativ freie Siebfläche
B	m	Siebbreite
d	m	Drahtdicke
D_z	-	Diffusionskoeffizient
e	m	Amplitude, Schwingradius der Kreisbewegung
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
g_n	m/s^2	Normalkomponente der Erdbeschleunigung
H	m	Schichthöhe
k	1/s	Geschwindigkeitskonstante
k_L	1/m	Siebkonstante
k_n	-	Konstante
k_{ST}	-	Stoßzahl
K	-	Maschinenkennziffer
K_V	-	Siebkennziffer
L	m	Sieblänge
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
m_a	kg	Ausgleichsmasse
\dot{m}_A	kg/s	Aufgabemassenstrom
$\dot{m}_{A,B}$	kg/ms	Aufgabemassenstrom bezogen auf die Siebbreite
\dot{m}_F	kg/s	Feingutmassenstrom
$\dot{m}_{F,A}$	kg/s	Feingutmassenstrom an der Siebaufgabe
$\dot{m}_{F,D}$	kg/s	Feingutmassenstrom im Siebdurchgang
$\dot{m}_{G,A}$	kg/s	Grobgutmassenstrom an der Siebaufgabe
m_{Mat}	kg	Materialmasse am Sieb
m_S	kg	Siebkastenmasse
m_{Sges}	kg	Gesamtmasse Sieb

m_u	kg	Unwuchtmasse
n	-	Anzahl der Auftreffereignisse
n	-	Gleichmäßigkeitszahl
n	1/min	Drehzahl
n_L	1/m	Anzahl der Auftreffereignisse pro Meter
Q_A	m ³ /h	Aufgabeleistung
r	m	Schwingradius
r_a	m	Schwerpunktradius der Ausgleichsmasse
r_u	m	Schwerpunktradius der Unwuchtmasse
S_z	-	Entmischungskoeffizient
t	s	Zeit
t_F	s	Flugzeit des Korns
T	s	Periodendauer einer Schwingung
v_T	m/s	Transportgeschwindigkeit
V	-	Volumenanteil einer Kornfraktion
V_F	-	Volumenanteil des Feinguts
V_G	-	Volumenanteil des Grobguts
w	m	Maschenweite
W_n	-	Wahrscheinlichkeit für das Passieren der Siebmasche nach n Versuchen
W_{ges}	-	Gesamtwahrscheinlichkeit für das Passieren der Siebmasche
W_E	-	Wahrscheinlichkeit für das Passieren der Siebmasche bei einem Einzelwurf
W_G	-	Geometrische Durchgangswahrscheinlichkeit
W_H	-	Wahrscheinlichkeit für das Gelangen zum Siebboden aufgrund der Schichthöhe
W_K	-	Wahrscheinlichkeit des Kornverklemmens
W_V	-	Wahrscheinlichkeit für das Gelangen zum Siebboden aufgrund der Volumenverteilung
W^*	-	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer bestimmten Teilchengröße zur Zeit t in der Tiefe z

x	m	Korndurchmesser
Z_K	-	Klemmkornanteil
α	°	Abwurfwinkel
β	°	Neigungswinkel des Siebbodens
ε	-	Auflockerungskennziffer
η	-	Siebgütegrad
φ_L	rad	Ablösewinkel
φ_0	rad	Auftreffwinkel
ρ	kg/m ³	Dichte
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit
ψ	-	Kornform (Sphärizität)
Π	-	Kennzahl

1 Einleitung

Plasser & Theurer ist ein österreichisches Unternehmen mit Hauptsitz in Wien und Weltmarktführer für Gleisbaumaschinen. Das Stammwerk befindet sich in Linz. Weltweit beschäftigt das Unternehmen über 3000 Mitarbeiter und liefert seine Produkte in derzeit 106 Länder auf 5 Kontinenten. Der Unternehmenszweck ist die Entwicklung, die Produktion und das Service für Maschinen zum Bau und zur Instandhaltung von Gleisen. Dafür stellt die Firma folgende Gleisbaumaschinen her:

Stopfmaschinen, Schotterverteiler- und Planiermaschinen, Stabilisier- und Verdichtmaschinen, Bettungsreinigungsmaschinen, Maschinen für Gleisumbau und Gleisneubau sowie für Weichenumbau und Weichenneubau, Maschinen für die mobile Schienenbearbeitung (Schweißen und Schleifen), Maschinen für Messarbeiten und Fahrleitungsbau und diverse Spezialmaschinen.

Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf das Schwingsieb einer Bettungsreinigungsmaschine. Eine Bettungsreinigungsmaschine (Abbildung 1) ist eine meist gleisgebundene Arbeitsmaschine, die den Schotter in Gleisbetten von Verunreinigungen befreit.



Abbildung 1: Bettungsreinigungsmaschine RM80

Die Maschine arbeitet nach folgendem Prinzip:

- Aushub des Schotters mittels Räumkette
- Transport des Schotters auf das Sieb
- Trennen des Schotters vom Abraum auf mehreren Sieblagen
- Abtransport des Abraums
- Einbringen des gereinigten Schotters unter das Gleis und wenn erforderlich, Zufuhr von Neuschotter
- Verteilen des gereinigten Schotters

Der Abtransport des Abraums sowie die Neuzufuhr des Schotters erfolgen in der Regel durch Material-, Förder- und Siloeinheiten. Nach der Bettungsreinigung wird das Gleisbett mittels einer Gleisstopfmaschine und einer Schotterplaniermaschine durchgearbeitet.

Die Reinigung des Gleisschotters erfolgt auf einem Schwingsieb, das aus mehreren Siebebenen besteht (Abbildung 2).

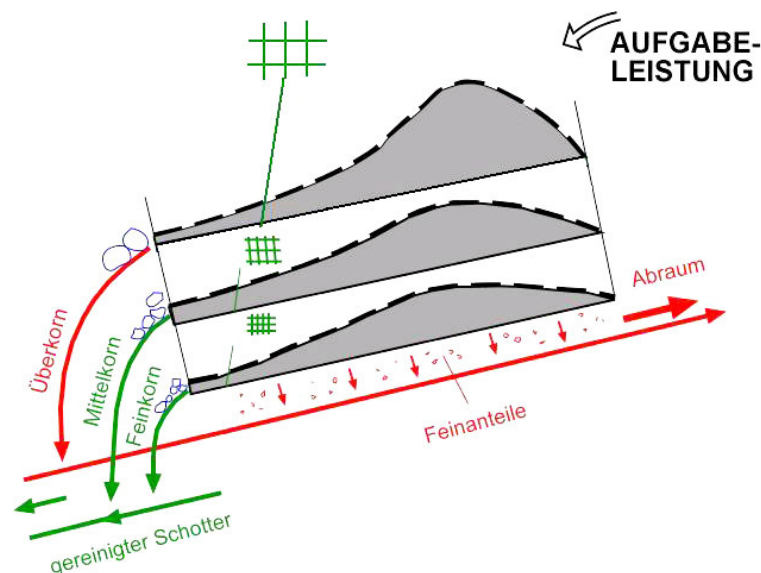


Abbildung 2: Aufbau und Funktion eines 3-lagigen Siebes¹

Auf der obersten Ebene wird das Grobkorn abgeschieden, auf der mittleren Ebene das Mittelkorn gewonnen. Auf der untersten Ebene werden die Feinanteile ausgeschieden und das Feinkorn gewonnen.

¹ vgl. Lichtberger, 2010, S.535

2 Ziele

Die Siebqualität ist für die Wirtschaftlichkeit einer Reinigungsmaschine ein entscheidender Faktor. Die Aussiebung von Feinanteilen und der Rückgewinn an gebrauchsfähigem Schotter wird von verschiedenen Maschinenparametern beeinflusst. Abbildung 3 stellt schematisch die den Siebprozess beeinflussenden Parameter an einem Linearschwingsieb dar.

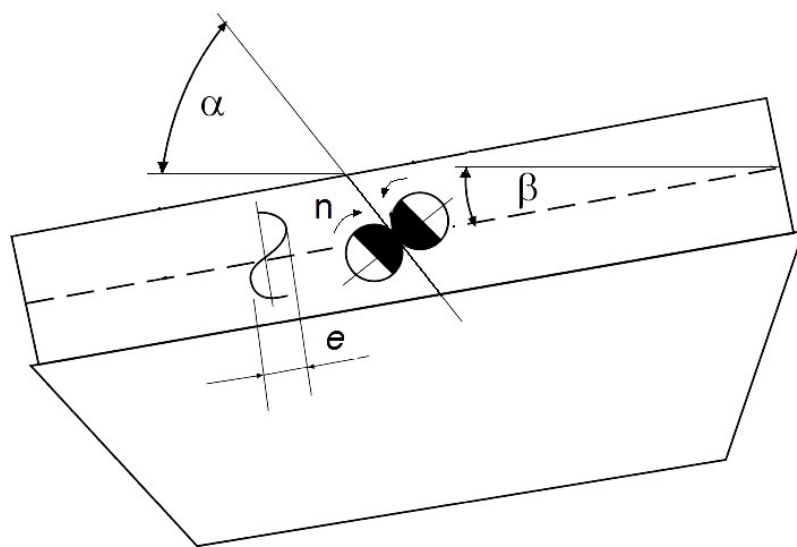


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Siebparameter²

- die Amplitude e des Siebbodens,
- die Drehzahl n des schwingenden Siebes,
- der Wurfwinkel α und
- die Siebbodenneigung β

Hinzu kommen noch die Größe der Siebfläche und die Ausführung der Siebböden, welche einen entscheidenden Einfluss bei der Siebung haben.

² vgl. Lichtberger, 2010, S.542

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, den Rückgewinn an gebrauchsfähigem Schotter anhand eines Siebmodells darzustellen. Die oben genannten Einflussgrößen sollen alle in die Modellbildung einfließen. Anhand bekannter Siebuntersuchungsergebnisse bei Praxiseinsätzen von Bettungsreinigungsmaschinen der Fa. Plasser & Theurer (Messung Altschotter, gereinigter Schotter, Abraum) kann man die Anwendbarkeit dieses Modells beurteilen und eventuelle Weiterentwicklungen in Aussicht stellen. Eine direkte Beurteilung der Einflussgrößen mit dem Siebmodell findet nicht statt. Dies würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

3 Allgemeines zur Gleisschotterreinigung

3.1 Warum Reinigung des Gleisschotters

Das Schotterbett erfüllt im System Gleis eine wichtige Funktion. Es hat auf die Lebensdauer und auf die Qualität der Gleislage einen wesentlichen Einfluss. Eine stabile Gleislage ist Voraussetzung für eine problemlose Funktion des Rad-Schiene-Systems.

Ein funktionsfähiges Schotterbett muss folgende Aufgaben erfüllen³:

- Möglichst gleichmäßige Verteilung des von den Radlasten auf die Schwellen ausgeübten Druckes auf den Untergrund,
- Sicherung der Lage der Schwellen, das heißt großen Widerstand gegen Längs- und Querverschiebungen der Schwellen,
- leichte Wiederherstellung der Gleislage nach deren Veränderung (Stopf- und Richtarbeiten),
- gute Wasser- und Luftdurchlässigkeit zur Sicherstellung einer langen Lebensdauer der Schwellen und zwecks Erhaltung der Tragfähigkeit des Unterbaus,
- Gewährleistung der Gleiselastizität zur Verminderung der dynamischen Kräfte und
- Gewährleistung von Korrekturmaßnahmen am Gleis durch Stopf- und Richtarbeiten.

Diese Eigenschaften bestehen nur, wenn nicht zu viel Feinkorn vorhanden ist und sich die Verschmutzung der Gleisbettung in Grenzen hält (als Feinkorn wird in der Regel eine Körnung bezeichnet, welche durch ein 22,4mm Quadratloch-sieb fällt). Verschiedene Einflüsse bewirken allerdings im Laufe der Zeit eine Verschmutzung der Bettung, die sich vom Untergrund nach oben aufbaut und im tragenden Bereich unter den Schwellen am größten ist (Abbildung 4).

³ vgl. Lichtberger, 2010, S.180



Abbildung 4: Verunreinigtes Schotterbett⁴

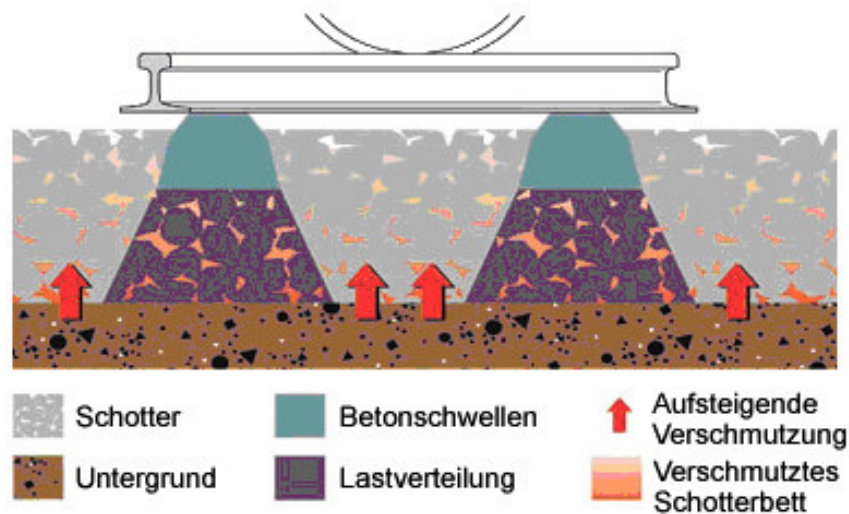
Folgende Ursachen sind für die Verunreinigung des Schotterbettes hauptverantwortlich⁵:

- Neuschotter,
- Betriebsbelastung,
- Überbeanspruchung des Untergrundes infolge zu geringer Bettungsstärke,
- Aufweichung des Untergrundes infolge fehlender Querneigung des Planums,
- fehlende Entwässerung,
- aufsteigende Feinanteile infolge Überbeanspruchung des Untergrundes,
- Feinbestandteile aus Transport,
- Feinbestandteile durch Ablagerungen aus der Luft und
- Instandhaltungsarbeiten.

Es ergibt sich eine ungünstige Druckverteilung auf das Planum, wenn das Schotterbett verschmutzt ist. Durch aufsteigende Feinanteile aus dem Untergrund nimmt die Verschmutzung zu (Abbildung 5).

⁴ Wenty, 2006a, S.8

⁵ vgl. Klotzinger, 2008a, S.122

Abbildung 5: Ungünstige Druckverteilung auf dem Planum⁶

Im verschmutzten Schotter sinkt die Reibung zwischen den einzelnen Schotterkorngrößen. Das Schotterbett kann die vorhin genannten Aufgaben nicht mehr erfüllen. Es kommt zu einer ungleichmäßigen Setzung des Gleisrostes. Die Wiederherstellung der idealen Gleislage durch „Stopfen“ (Verdichten der Schotterbettung) ist nur für kurze Zeit wirksam. Die Gleislage verschlechtert sich rasch, und der Untergrund wird immer stärker beansprucht. Im Gleis entstehen Senkungen, die unter Umständen zu Entgleisungen führen können.

Laut eines Berichts des Forschungs- und Versuchsamtes des internationalen Eisenbahnverbandes (ORE) ist der Schotter zu reinigen, wenn der Mittelwert der Proben, gemessen als Siebdurchgang durch ein 22,4 mm Quadratlochsieb, eine Verschmutzung von ≥ 30 Gewichtsprozent ergibt⁷.

Die Notwendigkeit einer Reinigung ist mit verschiedenen Methoden festzustellen. Infolge der Verunreinigung des Schotterbettes entstehen im Gleis Höhenfehler. Bei einer Messfahrt mit einem Messfahrzeug wird die Einsenkung einer belasteten Achse in Bezug zu den Nachbarachsen gemessen. Die Ergebnisse werden durch ein Analysesystem mit Güteziffern bewertet und weisen auf die Notwendigkeit einer Reinigung hin.

⁶ Klotzinger, 2008a, S.123

⁷ vgl. ORE Frage D182, Bericht Nr.2, 1991, S.33

Bei einer Schürfprobe werden aus dem Schotterbett Proben entnommen und durch eine Absiebung wird der aktuelle Verschmutzungsgrad bestimmt.

Bei der Kastenprobe wird durch Verschiebung einer Schwelle der maßgebliche Bereich erfasst. Der Prüfkasten wird in das Schotterbett bis zum Planum eingeschlagen und die Probe entnommen.

Es kann auch eine Beurteilung der Verunreinigung mittels Augenschein erfolgen. An Stellen großer Gleissenkungen wird der Schotter auf Verunreinigungen überprüft.

3.2 Anforderungen an den Oberbauschotter

Definition Oberbauschotter:

„natürliche, gebrochene, ungebundene Gesteinskörnungen aus mineralischen Quellen“⁸.

Der Oberbauschotter hat großen Einfluss auf die Qualität und Haltbarkeit des Gleises. Der Schotter muss sowohl den stofflichen als auch den granulometrischen Forderungen entsprechen, damit er seine Funktion optimal erfüllen kann.

3.2.1 Anforderungen an das Rohgestein

Das Rohgestein für Oberbauschotter soll folgende Bedingungen erfüllen⁹:

- Wetterbeständigkeit,
- große Zähigkeit,
- große Druckfestigkeit,
- keine Beimengungen, die die Luft- und Wasserdurchlässigkeit beeinträchtigen, wie z. B. Lehm und Erde,
- das Gestein soll würfelig und scharfkantig brechen und
- der gebrochene Schotter soll schlag- und kantenfest sein.

Am besten eignen sich Hartgesteine (Granit, Basalt, Diabas). Weichgesteine (Kalk, Dolomit, Sedimentgesteine) haben eine geringere Druckfestigkeit.

⁸ ÖBB, Technische Lieferbedingung für Oberbauschotter, 1998, S.3

⁹ vgl. Lichtberger, 2010, S.181

3.2.2 Technische Lieferbedingungen

3.2.2.1 Stoffliche Eigenschaften¹⁰

Der Schotter muss verwitterungsbeständig sein (Prüfung durch Kochen in einer Salzlösung). Die Wasseraufnahme darf 0,5 Gewichtsprozent nicht überschreiten. Beträgt die Wasseraufnahme mehr als 0,5 Gewichtsprozent, sind eine Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel und ein Kristallisationsversuch durchzuführen. Außerdem ist die Verwitterungsbeständigkeit nachzuweisen.

Der Schotter muss raumbeständig sein. Wenn der Verdacht auf „Sonnenbrand“ besteht, muss eine petrografische Untersuchung (Zusammensetzung der Kristalle, Entstehung, Verwendbarkeit) durchgeführt werden.

Der Schotter muss eine hohe Schlag- und Druckbeständigkeit aufweisen, und widerstandsfähig gegen Zertrümmerung und Abrieb sein. Die Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung erfolgt nach dem Los Angeles-Test. Eine Probe von 10 kg (5 kg Körnung 31,5/40 und 5 kg Körnung 40/50) wird zusammen mit 12 Stahlkugeln (Gesamtgewicht 5000 ± 25 g) mit einer Geschwindigkeit von 31-33 U/min 1000-mal in einem Zylinder um seine Achse gedreht. Nach Ablauf des Tests wird der Siebdurchgang durch ein 1,6 mm-Sieb bestimmt und daraus der LA-Koeffizient berechnet. Das Gewicht der abgesiebten Fraktion dividiert durch das Gewicht der Probe und mit hundert multipliziert, ergibt den LA-Koeffizient in Prozent. Der Schotter ist umso besser, je niedriger der Wert ist.

Typische LA-Koeffizienten einiger Schottersorten:¹¹

Granit	12 – 15
Basalt	8,7 – 9,5
Diabas	9,5 – 10,5
Kalkstein	13,7 – 23

Der LA-Wert muss ≤ 24 Gewichtsprozent betragen.

¹⁰ vgl. ÖBB, Technische Lieferbedingung für Oberbauschotter, 1998, S.4f.

¹¹ Klotzinger, 2008b, S.35

3.2.2.2 Granulometrische Eigenschaften¹²

Die Kornzusammensetzung wird durch Siebung mittels Quadratlochsieben festgestellt. Die Lieferkörnung wird durch das Paar Siebe beschrieben, zwischen denen der Hauptanteil der Körner liegt, z. B. ÖBB: Lieferkörnung 31,5/63 (Schotter I) für Hauptgleise und Lieferkörnung 16/31,5 (Schotter II) für Nebengleise. Tabelle 1 zeigt die zulässigen Werte der einzelnen Korngrößen für die oben genannten Lieferkörnungen.

Tabelle 1: Übersicht Lieferkörnung¹³

Größe [mm]	Kategorie			
	31,5/63		16/31,5	
	Soll	Toleranz	Soll	Toleranz
	Siebdurchgang in Gewichts %			
80	100	100	-	-
63	97-100	97-100	-	-
50	65-95	65-95	100	100
40	30-60	30-65	97-100	97-100
31,5	0-25	0-28	70-100	70-100
22,4	0-3	0-3	0-35	0-40
16	-	-	0-3	0-3
31,5/50	≥ 50	≥ 50	-	-

Der Verlauf der Sieblinie und die zulässige Toleranz für die Lieferkörnung 31,5/63 zeigt Abbildung 6.

¹² vgl. ÖBB, Technische Lieferbedingung für Oberbauschotter, 1998, S.6f.

¹³ ebd., 1998, S.6

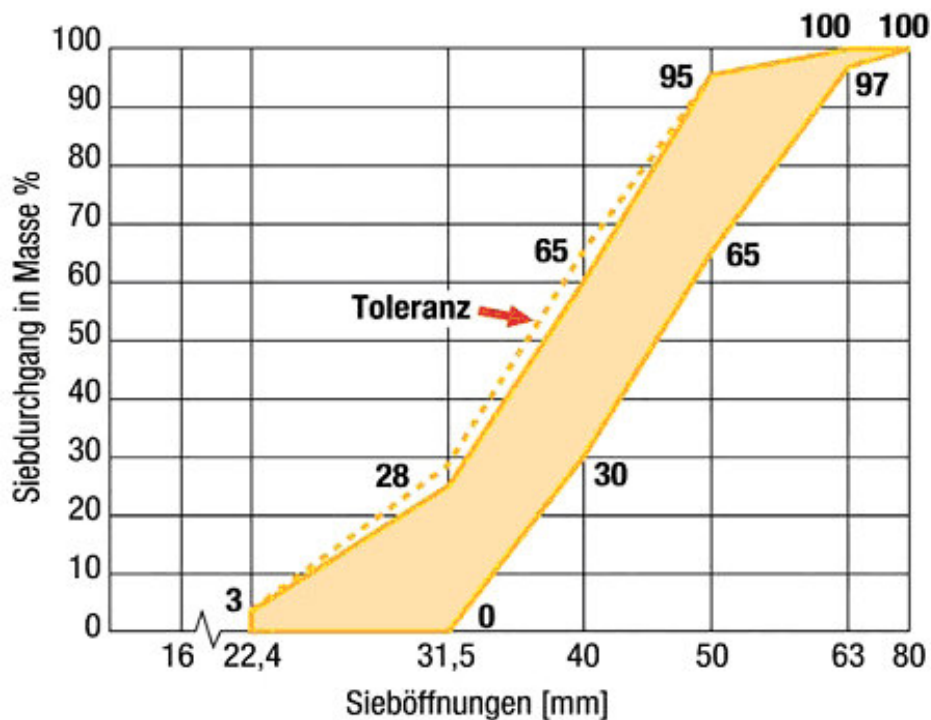


Abbildung 6: Zulässiger Bereich der Lieferkörnung 31,5/63 mm¹⁴

Unbeanstandet bleiben für Lieferkörnung 31,5/63 bzw. 16/31,5:

- Unterkornanteile < 22,4 mm bzw. < 16mm bis zu 3 Gewichtsprozent bei der Probenahme im Werk und bis zu 5 Gewichtsprozent bei der Probenahme auf der Baustelle.
- Unterkornanteile < 0,5 mm bis zu 1 Gewichtsprozent bei Trockensiebung.

Mehr als 6 Gewichtsprozent Körner mit einer Länge > 100 mm sind in einer Schotterprobe nicht zugelassen.

Hinsichtlich der Kornform muss der Oberbauschotter aus unregelmäßig geformten, scharfkantigen Körnern bestehen. Der Anteil an Körnern mit einem Verhältnis Länge/Dicke > 3:1 muss zwischen 5 und 30 Gewichtsprozent liegen. Geprüft werden die Korngruppen 31,5/50 bzw. 16/31,5.

Der Oberbauschotter muss rein sein. Er darf keine Fremdstoffe, wie organische, mergelige und tonige Verunreinigungen, enthalten. Die abschlämmbaren Bestandteile < 0,063 mm dürfen 1 Gewichtsprozent nicht überschreiten.

¹⁴ Klotzinger, 2008b, S.35

3.3 Leistung von Reinigungsmaschinen

Die Anforderungen an moderne Reinigungsmaschinen werden immer vielfältiger. Eine hohe Vortriebsgeschwindigkeit zur Nutzung kurzer Zugspausen, hohe Qualität des gereinigten Schotters, sowie der gleichzeitige Einsatz verschiedener Maschinensysteme sind gefordert¹⁵.

Die Leistung von Bettungsreinigungsmaschinen wird im Wesentlichen durch die Kapazität der Aushubkette und von der Größe der Siebanlage bestimmt.

Die erzielbaren Förderleistungen bei der Räumkette hängen von der Kettengeschwindigkeit, Schaufelgröße, Räumkanalgröße und verfügbaren Antriebsleistung ab. Aufgrund des Verschleißes liegt die maximale Kettengeschwindigkeit derzeit bei ca. 3,5 m/s¹⁶. Abbildung 7 zeigt den Arbeitsbereich der Räumkette abhängig von der Kettengeschwindigkeit und der Schaufelgröße.

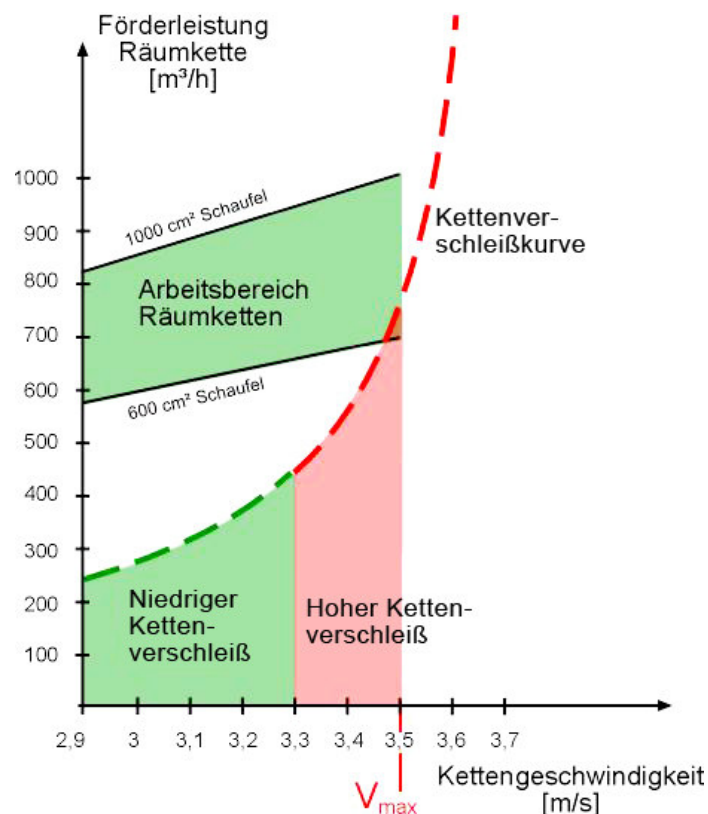


Abbildung 7: Förderleistung und Kettenverschleißkurve¹⁷

¹⁵ vgl. Wenty, 2006b, S.386

¹⁶ vgl. Misar, 2004 S.48

¹⁷ Lichtberger, 2010, S.532

Wie aus Abbildung 7 ersichtlich, liegt die maximale Kettenleistung bei etwa knapp unter $1000\text{m}^3/\text{h}$. Bei höheren Kettengeschwindigkeiten würde der Verschleiß überproportional steigen. Um höhere Förderleistungen zu erzielen ist der Einbau einer zweiten Aushubkette notwendig. Abbildung 8 zeigt die RMW 1500 mit einer Förderleistung bis zu $1500\text{m}^3/\text{h}$.



Abbildung 8: Hochleistungsreinigungsmaschine RMW 1500¹⁸

Bei der Siebanlage ist neben der Siebleistung auch die Qualität des rückgewonnenen Materials ein entscheidendes Kriterium. Eine reine Optimierung Richtung Leistung ginge auf Kosten der Qualität. Gebrauchsfähiger Schotter würde im Abraum verloren gehen, bzw. die Menge der Feinkornanteile im Rückgewinn würde mehr werden. Für die Wirtschaftlichkeit einer Schotterbettreinigungsmaschine ist die Siebqualität ein entscheidender Faktor. Abbildung 9 zeigt den Zusammenhang zwischen Siebleistung und Qualität.

¹⁸ Lichtberger, 2009, S.45

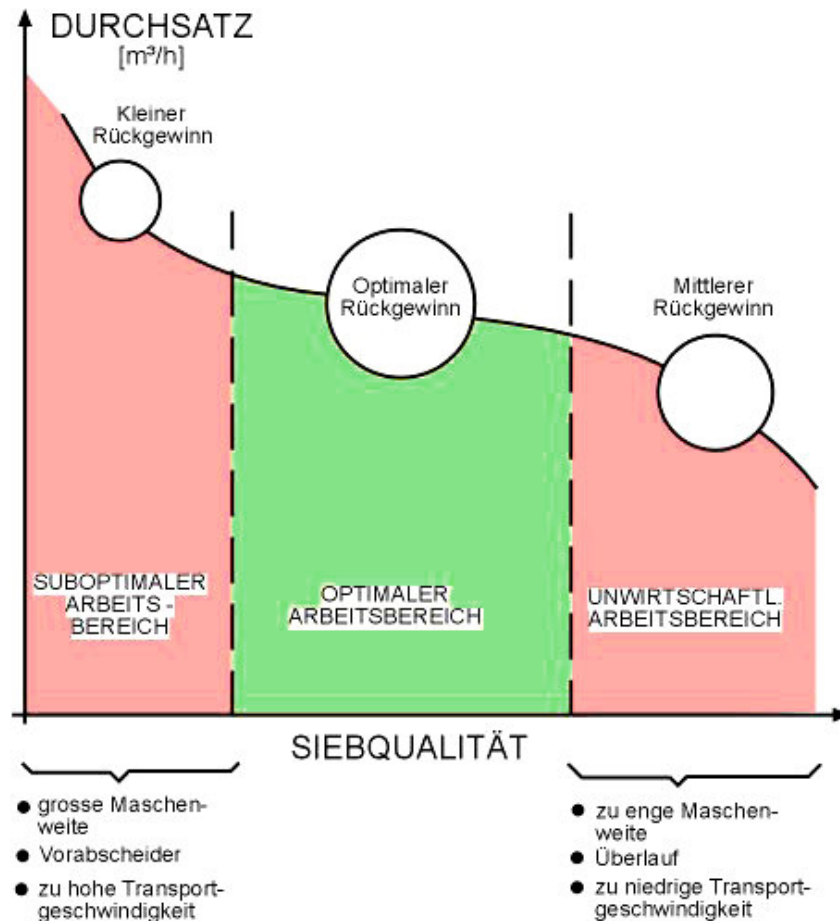


Abbildung 9: Qualitativer Zusammenhang zwischen Durchsatz, Rückgewinn und Siebqualität¹⁹

Siebleistung und Qualität werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst, wie z.B. der Größe des Siebes, der Anzahl der Siebdecks, dem Anstellwinkel, der Siebfrequenz, der Maschenweite, der Siebamplitude, dem Beschickungsgrad und der Materialbeschaffenheit des Siebguts (Feuchte, Feinanteil). Die Baugröße eines Siebes ist durch das Lichtraumprofil begrenzt. Aufgrund dieser Einschränkung in Höhe, Länge und Breite können Einzelsiebe nur bis Siebleistungen von max. 500-700m³/h gebaut werden. Um eine Leistungssteigerung zu erzielen, muss die Anzahl der Siebe erhöht werden. Mit einer Doppelsiebanlage können Leistungen um die 1000m³/h erzielt werden. Eine weitere Steigerung der Siebkapazität bieten Maschinen mit drei Siebanlagen (Abbildung 10).

¹⁹ Lichtberger, 2010, S.534



Abbildung 10: Bettungsreinigungsmaschine mit 3 Siebanlagen²⁰

Mit Leistungen bis zu $1500\text{m}^3/\text{h}$ stößt man zurzeit an die Leistungsgrenze bei den Schotterbettreinigungsmaschinen. Um in Zukunft die Kapazitäten zu erhöhen, müssen die Maschinensysteme angepasst, vergrößert oder vervielfältigt werden.

²⁰ Wenty, 2006a, S.9

4 Grundlagen der Siebklassierung

„Klassierprozesse dienen zur Trennung von Körnerkollektiven in Produkte unterschiedlicher Größenzusammensetzung“²¹.

Das einfachste Verfahren zum Klassieren ist das Sieben. Die Trennung der Körner erfolgt dabei durch Vergleich der Korngröße x mit der Maschenweite w (Abbildung 11). Durch meist schwingende oder rotierende Bewegung des Sieb-
bodens kommt es unter dem Einfluss der Erdbeschleunigung g zu einer Relativbewegung zwischen den Körnern und den Sieböffnungen. Körner $x < w$ fallen durch die Maschen und gelangen ins Feingut, Körner $x > w$ wandern über das Sieb ins Grobgut. Probleme bereiten Grenzkörner, die annähernd so groß sind wie die Sieböffnung. Sie benötigen eine lange Verweilzeit am Sieb um durch die Öffnung zu fallen. Grenzkörner können Sieböffnungen auch völlig blockieren, was zu einer geringeren Siebleistung führt.

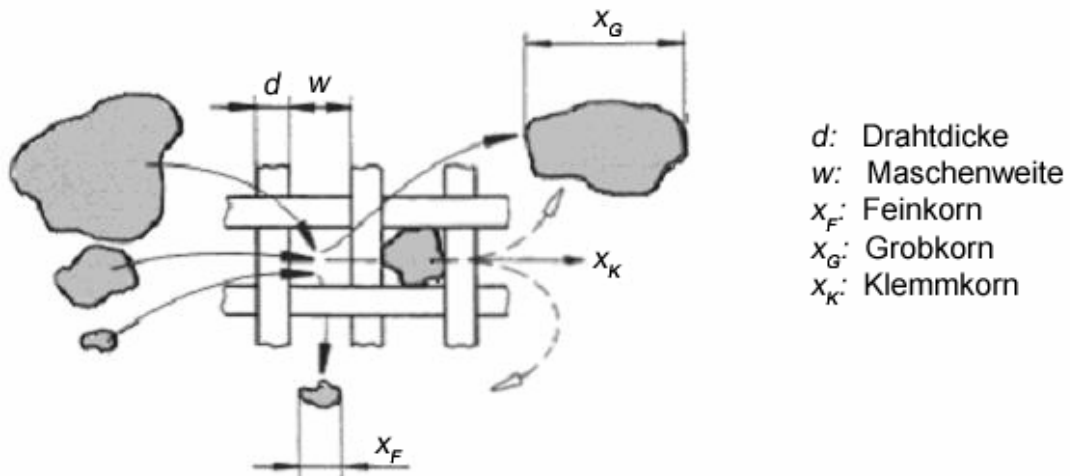


Abbildung 11: Vergleich der Partikeln des Aufgabeguts mit der Maschenweite²²

Beim Siebklassieren handelt es sich in den meisten Anwendungsfällen um einen kontinuierlichen Prozess. Wie Abbildung 12 zeigt, wird das Aufgabegut mit der Korngrößenverteilung $Q(x)$ in Feingut und Grobgut getrennt.

²¹ Schubert, 1989, S.195

²² Schmidt, 1995, S.2

Bestimmend für den Durchsatz und den Trennerfolg bei einem Siebprozess sind die Siebguteigenschaften, die Maschinenparameter, die Trennflächenparameter und die Betriebsbedingungen²³.

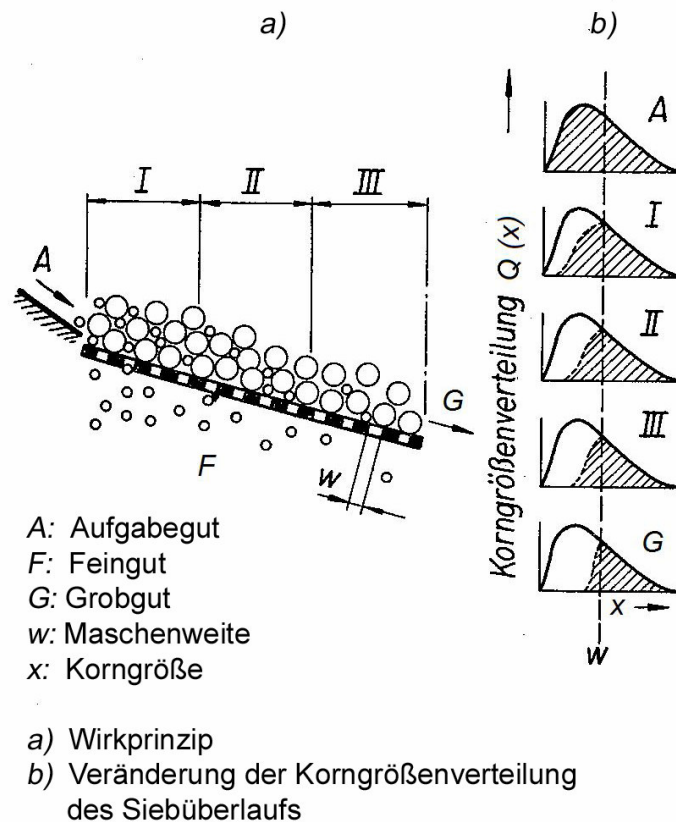


Abbildung 12: Schematischer Siebprozess²⁴

Eine Absiebung kann nur erfolgen, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind²⁵:

- Das Feingut muss während seines Weges über den Siebboden die Möglichkeit haben sich über den Sieböffnungen einzuordnen.
- Zum Bewegen des Feinguts durch die Sieböffnungen muss eine ausreichend große Kraft vorhanden sein.
- Das Siebgut muss über den Siebboden befördert werden.

Eine genauere Beschreibung aller auf den Siebvorgang einwirkenden Einflussgrößen ist in Kapitel 4.2 zu finden.

²³ vgl. Lange, 1997, S.8

²⁴ Schubert, 1989, S.195

²⁵ vgl. Höffl, 1986, S.286

4.1 Theorie des Siebens

Zum Verwirklichen des Grundvorgangs, des Vergleichs der Korngröße mit der Maschenweite, sollte die Siebgutmatte die Dicke eines Grobgutkorns nicht überschreiten. In diesem Fall sind nahezu alle Körner in Kontakt mit der Siebfläche und es sind nur wenige Würfe notwendig, um das Aufgabegut in Fein- und Grobgut zu trennen. Die Wurfweite bei der idealen Siebung sollte etwa der Siebteilung ($w+d$) entsprechen. Dies führt zu einer geringen Fördergeschwindigkeit über das Sieb und zu einer geringen Baulänge. Zum Erzielen einer hohen Siebleistung müsste das Sieb extrem breit ausgeführt werden. Aus konstruktiven Gründen schließt man daher den Kompromiss einer doppelt bis dreimal so langen wie breiten Siebfläche. Gleichzeitig erhöht man die Aufgabemenge und die Transportgeschwindigkeit durch größere Wurfweiten. So wird in der Praxis anstelle der idealen Dünnschichtsiebung Dickschichtsiebung vorgenommen.²⁶

Durch die Vibration des Siebbodens wird das Siebgut in Bewegung versetzt. Diese Bewegung hat zwei Aufgaben: Erstens muss die Dickschicht vertikal aufgelockert werden, damit das Feinkorn zum Siebboden gelangen kann (Segregation). In Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung, den Haftkräften und der Reibung genügt schon eine geringe Vibration, um eine Segregation zu erreichen²⁷. Zweitens wird das Siebgut durch die Vibration gemeinsam mit der Neigung des Siebbodens Richtung Siebbodenende transportiert. Neben der Segregation kommt es zu einem Mischvorgang, welcher über der Höhe der Gutsschicht zu einer konstanten Feingutkonzentration führt, die mit der Länge des Siebes abnimmt²⁸. Als mathematische Beschreibung für den Feingutanteil aus der Gutmatte wird häufig eine Reaktion erster Ordnung angesetzt (siehe Kapitel 4.3.1).

Durch den Feingutdurchfall verringert sich die Schichtdicke entlang des Siebbodens. Man spricht von Dickschicht am Anfang und von Dünnschicht am Ende des Siebbodens. Ausnahmen ergeben sich dann, wenn der Feingutanteil gering ist und somit eine Dickschicht bis zum Ende erhalten bleibt. Körner die viel kleiner als die Maschenweite sind, werden schon zu Beginn mit großer

²⁶ vgl. Schmidt, 2003, S.12

²⁷ vgl. ebd., 2003, S.13

²⁸ vgl. Lange, 1997, S.7

Wahrscheinlichkeit ausgesiebt. Im vorderen Bereich des Siebes ist daher der Durchsatz sehr hoch. Am Ende des Siebes findet die Absiebung des Grenzkorns statt, dessen Größe in der Nähe der Maschenweite liegt. Der Durchsatz ist hier wesentlich kleiner, die Gutschicht hat in der Regel nur noch die Dicke einer Korngröße. Daraus lässt sich bereits erkennen, dass Sieblänge und Transportgeschwindigkeit (Verweilzeit am Sieb) einen entscheidenden Einfluss auf den Trennerfolg haben.

4.1.1 Siebgutbewegung und Kennziffern

Die Ausrüstungen für das Siebklassieren kann man vom Gesichtspunkt der Gutbewegung auf dem Siebboden in mehrere Gruppen gliedern²⁹. Mit Ausnahme von Sonderbauarten sind diese in Abbildung 13 dargestellt.

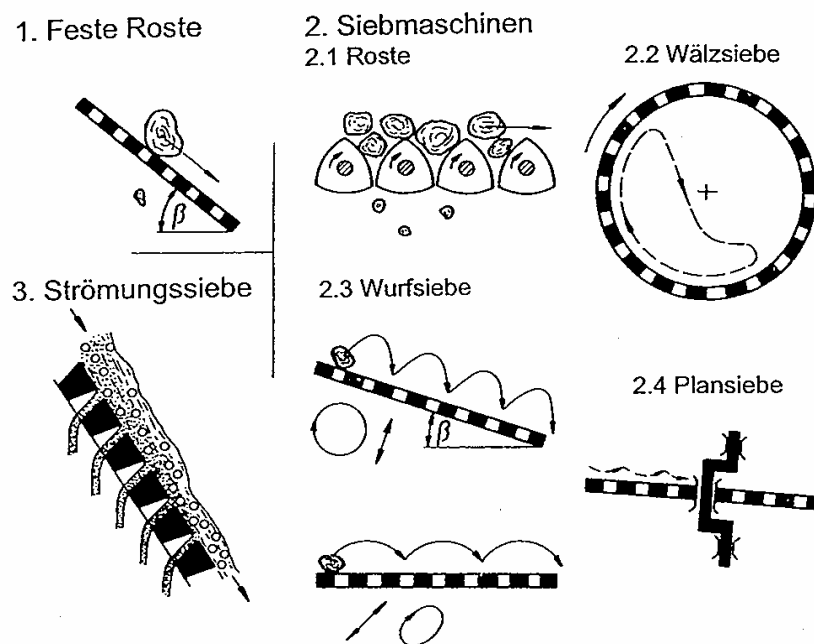


Abbildung 13: Einteilung der Ausrüstungen zum Siebklassieren nach der Siebgutbewegung³⁰

Bei festen Rosten muss der Siebboden entsprechend geneigt sein, damit ein Guttransport durch Gleiten und Rollen stattfinden kann. Dies wird teilweise für einfache Siebprozesse im Grob- und Mittelkornbereich eingesetzt.

²⁹ vgl. Schmidt, 1984, S.900

³⁰ Schubert, 1989, S.197

Bei den Siebmaschinen kann man unterscheiden zwischen bewegten Rosten, Wälzsieben (Trommelsieben), Wurfsieben und Plansieben. Wurfsiebe und Plansiebe sind Schwingsiebmaschinen. Bei den Rost-Siebmaschinen werden die Elemente des Siebbodens (Roststangen, Rollen, Scheiben) angetrieben und dadurch der Siebguttransport bewirkt. Bei den Wälz- oder Trommelsieben ist der Mantel der rotierenden Trommel der Siebboden. Ein wurfartiger Siebguttransport erfolgt bei den Wurfsieben, ausgelöst durch eine Schwingung in senkrechter Längsebene. Bei Kreisschwingern und bei Schwingsieben mit direkt erregtem Siebbelag muss der Siebboden für den Guttransport genügend geneigt sein. Bei den Linearschwingern und Ellipsenschwingern ist eine Neigung des Siebbodens nicht zwingend erforderlich. Plansiebe schwingen in der Siebebene und das Siebgut bewegt sich dabei auf zyklodartigen Bahnen über den Siebboden hinweg.

Bei Strömungssieben geschieht der Siebguttransport unter dem Einfluss der Strömungskräfte einer Flüssigkeit oder eines Gases.

Wurfsiebe sind am weitesten verbreitet. Liegt das Siebgut in einer Dünnschicht vor, so werden die Bewegungsimpulse unmittelbar vom Siebboden auf die einzelnen Körner übertragen und es kommt zur Ausbildung von Wurfbewegungen (Einzelkorndynamik). Liegt eine Dickschicht vor, so pflanzen sich die vom Siebboden an die Körner der ersten Schicht übertragenen Impulse zunehmend gedämpft in die überlagernden Schichten fort, wobei wegen der unterschiedlichen Übertragungsgeometrien und der gegenseitigen Bewegungsbehinderung stochastische Bewegungsabläufe vorherrschen. Die Ausbildung der Wurfbewegung ist mitbestimmend für den Durchsatz und den Trennerfolg. Die Abwurfgeschwindigkeit und der Abwurfwinkel beeinflussen maßgeblich die Auflockerung (Wurfhöhe), die Wurfweite und somit die Transportgeschwindigkeit. Schließlich hängen davon auch die Auftreffgeschwindigkeit sowie der Auftreffwinkel ab.³¹

³¹ vgl. Schubert, 1989, S197f.

Folgende Faktoren sind für die Siebgutbewegung wesentlich und deshalb an die jeweiligen Erfordernisse anzupassen:

- Siebbodenamplitude e
- Winkelgeschwindigkeit ω
- Wurfwinkel α
- Siebbodenneigung β

Auf Grundlage der in Abbildung 14 dargestellten Beschleunigungen und Abwurfverhältnisse bei Wurfsieben werden für die Beurteilung der Bewegungsverhältnisse folgende dimensionslose Kennziffern benutzt³²:

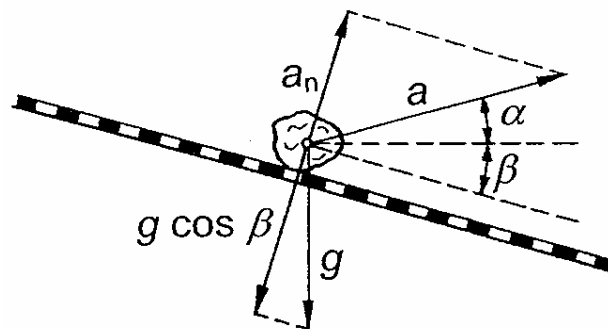


Abbildung 14: Wirkende Beschleunigungen und Abwurfverhältnisse³³

Die Maschinenkennziffer K setzt die am Antrieb wirkende Trägheitskraft bzw. Beschleunigung ins Verhältnis zur Schwerkraft bzw. Erdbeschleunigung.

$$K = \frac{a}{g} = \frac{e \cdot \omega^2}{g} \quad (1)$$

Die Maschinenkennziffer ist ein Maß für die dynamische Beanspruchung der einzelnen Maschinenteile.

³² vgl. Kluge, 1951 S.705

³³ Schubert, 2003, S.511

Der Abwurfwinkel α ist bei Kreisschwingern nicht, wie bei der gerichteten Schwingung, frei wählbar, sondern von der Beschleunigung $e \cdot \omega^2$ abhängig.

Für Linearschwingsiebmaschinen gilt (Abbildung 15b):

$$K_v = \frac{e \cdot \omega^2 \cdot \sin(\alpha + \beta)}{g \cdot \cos \beta} = K \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \quad (5)$$

und für den Ablösewinkel φ_L :

$$\sin \varphi_L = \frac{g \cdot \cos \beta}{e \cdot \omega^2 \cdot \sin(\alpha + \beta)} = \frac{1}{K_v} \quad (6)$$

Der Abwurfwinkel α ist bei Linearschwingern durch die Anordnung bzw. die Schwingrichtung des Richterregers vorgegeben. Theoretisch sind deshalb auch waagrechte Trennflächen möglich.

In Abbildung 16 sind die Wurfbahnen von Einzelkörnern in Abhängigkeit von der Siebkennziffer und die Siebbodenbewegung dargestellt. Man erkennt, dass das Ablösen des Kornes vom Siebboden umso eher erfolgt und die Wurfbahnen umso höher und weiter sind, je größer die K_v -Zahl ist.

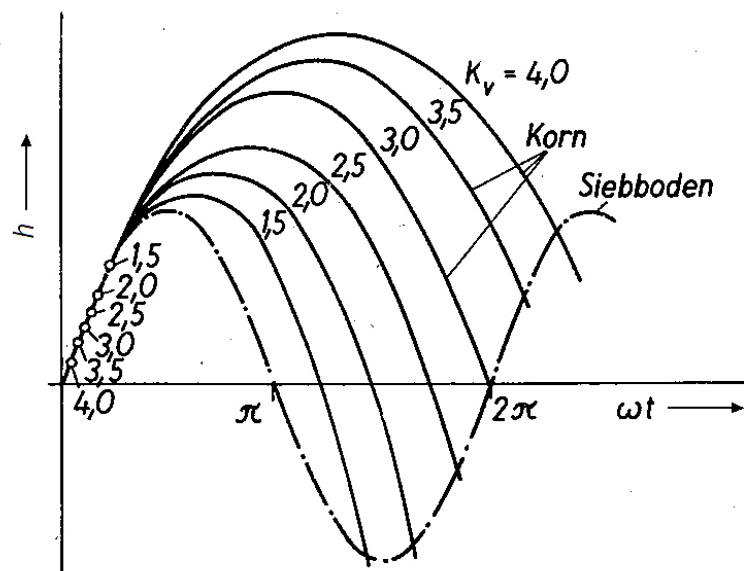


Abbildung 16: Wurfbahn eines Kornes in Abhängigkeit von der Siebkennziffer³⁵

³⁵ Schubert, 1989, S.200

Die Siebkennziffer K_V muss auf die jeweiligen Klassierbedingungen abgestimmt werden, um große Durchsätze bei günstigem Trennerfolg zu erhalten. Dazu enthält Tabelle 2 einige orientierte Werte, die den Zusammenhang zwischen Siebkennziffer und Trennwirkung veranschaulichen.

Tabelle 2: Zusammenhang Siebkennzahl und Siebwirkung³⁶

K_V	Trennbewertung
1,6...1,8	Sehr schonende Absiebung für leicht siebbares Gut
2,1...2,5	Schonende Absiebung für schwer siebbares Gut
3,0...3,3	Scharfe Absiebung für schwer siebbares Gut mit großen Mengen an Feinkorn
3,3...4,0	Sehr scharfe und auflockernde Siebung
5,0...6,0	Besonders siebschwieriges Gut

Solange $K_V < 1$ ist, bleiben die Körner ständig mit dem Siebboden in Kontakt. Theoretisch beginnt das Abheben, wenn $K_V = 1$ überschritten wird.

Bei technischen Siebprozessen kann man im Allgemeinen nur Wurfbewegungen erwarten, wenn $K_V > 1,5$ ist. Im Bereich K_V 1,5 bis 2,5 sind die Bedingungen für schonendes Absieben gegeben, weil hier die Relativgeschwindigkeit zwischen Siebboden und Siebgut beim Auftreffen relativ gering ist. Die Relativgeschwindigkeiten wachsen mit zunehmender K_V -Zahl. Sie sind jeweils am größten, wenn die Wurfzeit der Periodendauer einer Siebbodenschwingung oder einem Mehrfachen davon entspricht. Die so genannte einfache oder höhere statische Resonanz bei³⁷:

$$K_V = \sqrt{1 + (n \cdot \pi)^2} \quad (7)$$

für $n = 1, 2, 3, \dots$ $K_V = 3,297, 6,362, 9,478$

³⁶ vgl. Stieß, 2009, S.291

³⁷ vgl. Schubert, 1989, S.200

Bei einer Dickschichtsiebung sind wegen der Impulsdämpfung höhere K_V -Zahlen notwendig, als sie sich aufgrund der Einzelkorndynamik ergeben, um einen befriedigenden Sieberfolg zu gewährleisten. Für sehr schwierige Siebprozesse werden K_V -Zahlen bis zu etwa 8 angewendet³⁸.

4.1.2 Durchgangswahrscheinlichkeit

Ob und mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Korn durch eine Sieböffnung fällt, ist vor allem von folgenden Einflussgrößen abhängig³⁹:

- Verhältnis Korngröße x zur Maschenweite w
- relativ offene Siebfläche A_0
- Auftreffgeometrie sowie Relativgeschwindigkeit der Körner beim Auftreffen auf den Siebboden
- Höhe H der Siebgutschicht
- Kornform und Form der Sieböffnungen
- Volumen- bzw. Massenanteil der einzelnen Kornfraktionen im Siebgut

Die Wahrscheinlichkeit W_E für das unbehinderte Passieren eines Einzelkorns bei senkrechtem Auftreffen und quadratischen Sieböffnungen ergibt sich nach Abbildung 17 zu⁴⁰:

$$W_E = \left(\frac{w - x}{w + d} \right)^2 = \left(\frac{w}{w + d} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{x}{w} \right)^2 \quad (8)$$

³⁸ vgl. Schubert, 2003, S.513

³⁹ vgl. Höfl, 1986, S.288

⁴⁰ vgl. Jansen, 1967, S.338

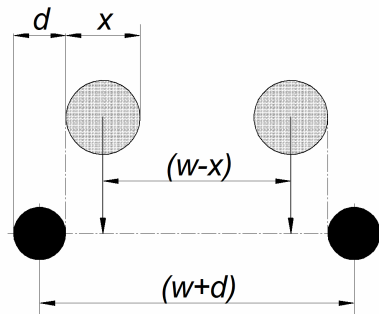


Abbildung 17: Durchgangswahrscheinlichkeit für ungehindertes Passieren bei senkrechtem Auftreffen⁴¹

Die Durchgangswahrscheinlichkeit hängt folglich sowohl von der relativ offenen Siebfläche $(w/(w+d))^2$ als auch von dem Korngrößen-Maschenweitenverhältnis x/w ab. Der Kehrwert der Wahrscheinlichkeit $1/W_E$ gibt die Zahl der notwendigen Würfe für ein Einzelkorn an, um die Masche zu passieren. Abbildung 18 zeigt diesen Zusammenhang in Abhängigkeit vom Korndurchmesser-Maschenweitenverhältnis x/w für verschiedene Drahtdurchmesser-Maschenweitenverhältnisse d/w .

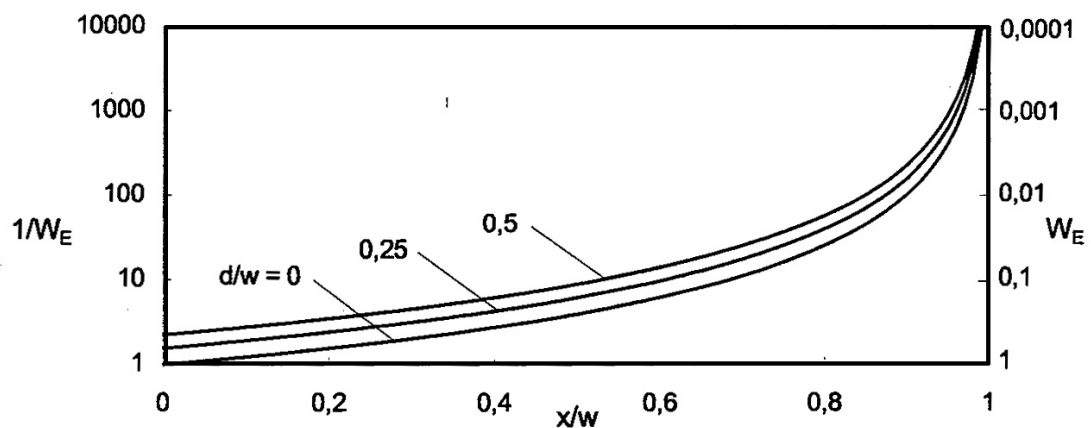


Abbildung 18: Anzahl notwendiger Würfe und Durchgangswahrscheinlichkeit⁴²

Man sieht, dass mit wachsendem x/w die Anzahl der notwendigen Auftrefferereignisse für unbehindertes Passieren stark ansteigt.

⁴¹ vgl. Schubert, 1989, S.205

⁴² Lange, 1997, S.10

Bei einer Dickschicht behindern sich die Körner gegenseitig beim Durchgang durch die Masche. Das Feingut wird durch das Grobgut mit dem Volumenanteil $V_G = 1 - V_F$ behindert. Für die auf den Volumenanteil des Feinguts bezogene Durchgangswahrscheinlichkeit gilt $W_V \sim V_F$. Für Körner, die sich nicht direkt am Siebboden befinden, nimmt die Durchgangswahrscheinlichkeit mit zunehmender Schichthöhe ab, sodass $W_H \sim w/H$ ist. Daraus ergibt sich die Gesamtdurchgangswahrscheinlichkeit W_{ges} .⁴³

$$W_{ges} = W_E \cdot W_V \cdot W_H = \left(\frac{w - x}{w + d} \right)^2 \cdot V_F \cdot \frac{w}{H} \quad (9)$$

Für die Durchführung von Siebprozessen ist aus dem Vorangegangenen die Schlussfolgerung abzuleiten, dass beim Transport des Siebguts über den Siebboden hinweg eine möglichst hohe Anzahl von günstigen Auftreffereignissen für das Feinkorn realisiert werden muss.

4.2 Einflussgrößen beim Siebvorgang auf Wurfsiebmaschinen⁴⁴

Auf den Siebprozess wirken eine Vielzahl von Einflussgrößen, die in vier Gruppen zusammengefasst werden können:

- Siebguteigenschaften
- Maschinenparameter
- Trennflächenparameter
- Betriebsbedingungen

4.2.1 Einflüsse des Siebguts

Die Korngrößenverteilung ist die wesentliche Größe, die den Siebprozess beeinflusst. Für den Erfolg der Klassierung ist der Grenzkorngehalt mit einem Korndurchmesser-Maschenweitenverhältnis 0,8-1,3 ausschlaggebend, da in diesem Bereich die Durchgangswahrscheinlichkeit klein ist bzw. auf Null absinkt und bei ungünstigen Betriebsverhältnissen Sieböffnungen verschlossen

⁴³ vgl. Höffl, 1986, S.289

⁴⁴ vgl. Höffl, 1986, S.289ff.

werden. Des Weiteren wird das Sieben durch die Kornform, die Festkörper- und Schüttdichte, die Feuchtigkeit und die damit verbundene Haftneigung beeinflusst. Die Siebung ist bei splittrigen und stängeligen Kornformen schwieriger als bei kugeligen bzw. kubischen Kornformen. Mit zunehmender Schüttdichte wachsen die Massenkkräfte. Diese erhöhen die Durchgangswahrscheinlichkeit. Die Oberflächenfeuchte kann bei bestimmten Feuchtigkeitsgehalten zu erheblichen Beeinträchtigungen führen. Bis 6-8% Feuchtigkeitsgehalt kann wirtschaftlich gearbeitet werden, danach verschlechtern sich die Klassierbedingungen. Im Bereich der Nasssiebung (Feuchtigkeitsgehalt $>30\%$) verbessern sich wieder die Trennbedingungen. Dies wird technisch genutzt durch gezielte Befeuchtung.

4.2.2 Einflüsse maschinentechnischer Parameter

Die Maschinenparameter bewirken die Bewegung des Siebguts auf der Trennfläche. Sie sind für die Dimensionierung der Trennflächengröße sowie der Konstruktionselemente von Bedeutung, weil davon Wurfbewegung, Transportgeschwindigkeit, damit Verweilzeit der Körner auf der Trennfläche und Beanspruchung der Maschinenelemente abhängen. Die Maschinenparameter sind messbare Größen, die auf der Grundlage der Einzelkorndynamik für Wurfsiebmaschinen unter Annahme eines gleit- und rollfreien Abwurfes der Körner gewählt wurden. Die tatsächlichen Bewegungsverhältnisse sind aufgrund des elastischen Verhaltens von Siebgutschicht und Trennfläche sehr kompliziert. Um dennoch eine Abschätzung zum Transport- und Wurfverhalten von Siebmaschinen vornehmen zu können, wird die ideale Bewegung eines Einzelkorns betrachtet.

Die Schwingungsparameter wie Schwingungsform, Schwingungsfrequenz, Amplitude, Schwingungsrichtung und Neigungswinkel haben bei Wurfsiebmaschinen einen großen Einfluss auf den Siebvorgang. Aus dem Vorangegangenen wird deutlich, dass die Auslegung der Schwingungsdaten eines Wurfsiebes auf die jeweilige Siebaufgabe abzustimmen ist. Die Wahl der Siebkennzahl K_V richtet sich danach, ob es sich um eine schonende Absiebung oder um ein schwieriges Siebgut handelt. Bei gleicher K_V -Zahl und gleichem Wurfwinkel ist die Scheitelhöhe der Wurfbahn der Amplitude linear proportional. Bei niedriger Schwingungsfrequenz und großer Amplitude werden die Körner höher geworfen

als bei kleiner Amplitude und großer Frequenz. Dies ist vor allem für die Auflockerung und den Siebguttransport entscheidend. Grobe Körnungen benötigen für eine befriedigende Auflockerung eine größere Amplitude und eine kleinere Schwingungsfrequenz als feine.

4.2.3 Trennflächenparameter

Trennschärfe, Zuverlässigkeit und Produktivität der Siebmaschinen sind von der Gestaltung der Siebböden abhängig. Die Länge der Trennfläche stellt die Haupteinflussgröße für die Trennschärfe und die Siebbreite für den Durchsatz dar. Als mittleres Längen-Breiten-Verhältnis hat sich L/B 2-2,5 durchgesetzt. Die Befestigung der Trennfläche beeinflusst die Schwingung bzw. Dämpfung der Siebgutmatte und somit die Klemmneigung der Körner. Die Form und die Größe der Sieböffnungen hat Einfluss auf den Durchgang. Die Gleichförmigkeit der Sieböffnungen ist neben der Siebbodenlänge ein wesentliches Kriterium für die Trennschärfe. Die freie Fläche des Siebbodens sollte möglichst groß sein, um einen hohen Durchsatz zu erzielen. Sie hängt aber von der erforderlichen Festigkeit ab.

4.2.4 Betriebsbedingungen

Wichtige Betriebsbedingungen sind Massen- und Volumendurchsatz und deren Schwankungen, die Beschickungsart und der Erblindungszustand der Trennfläche. Es ist bei den jeweiligen Maschineneinstellungen auf einen günstigen Durchsatz bei gleichzeitig bester Trennschärfe zu achten. Es sollte eine gleichmäßige Gutaufgabe in Transportrichtung über die gesamte Trennflächenbreite erfolgen. Die Schichthöhe sollte das 3- bis 4-fache der Maschenweite nicht übersteigen.

4.3 Kinetische Modelle der Siebung

Aufgrund der vielen Einflussgrößen beim Siebprozess und deren komplexen Zusammenwirken ist eine rein analytische Behandlung, sozusagen als ideale Theorie, nicht realisierbar. Man benützt vielmehr kinetische Modelle, die das Bewegungs- und Abscheideverhalten von Körnerkollektiven unterschiedlicher Größe und Form beschreiben.

4.3.1 Sieben als Reaktion 1.Ordnung

Einen einfachen und anschaulichen Ansatz für die Beschreibung des Siebdurchgangs liefert die Kinetik des Siebvorganges durch einen Prozess 1.Ordnung. Man geht davon aus, dass der Feingutanfall stets proportional zum jeweiligen Feingutgehalt der Siebgutmatte ist, der entlang des Siebes abnimmt. Bezeichnet man mit m_F eine Feingutmasse, die sich zum Zeitpunkt t noch auf dem Siebboden befindet, so folgt für einen kinetischen Prozess 1.Ordnung folgende Differentialgleichung für die Absiebgeschwindigkeit der Feingutmasse mit der Geschwindigkeitskonstante k^{45} :

$$-\frac{dm_F}{dt} = k \cdot m_F \quad (10)$$

Nach Trennung der Variablen liefert die Integration über die Zeit mit der Anfangsbedingung $m_{F,A}$ für $t=0$ die Feingutmasse m_F , die nach der Zeit t noch auf dem Siebboden verblieben ist:

$$\ln \frac{m_F}{m_{F,A}} = -k \cdot t \quad \text{bzw.} \quad m_F = m_{F,A} \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (11)$$

Für den Feingutanteil $m_{F,D}$, der nach der Zeit t ausgesiebt wurde, folgt aus Gleichung (11):

$$m_{F,D} = m_{F,A} [1 - \exp(-k \cdot t)] \quad (12)$$

Zur Beschreibung des kontinuierlichen Siebvorganges wird die Siebzeit durch die Sieblänge und die Transportgeschwindigkeit ersetzt. Anstelle der Siebgutmasse m folgt der Massenstrom \dot{m} . Aus Gleichung (12) erhält man:

$$\dot{m}_{F,D} = \dot{m}_{F,A} \left[1 - \exp\left(\frac{-k \cdot L}{v_T}\right) \right] \quad (13)$$

⁴⁵ vgl. Standish, 1985a, S.58

Die Geschwindigkeitskonstante k beinhaltet die den Siebprozess beeinflussenden Parameter, wie Auflockerung bzw. Schichtung des Guts, wirksame Beschleunigung, Verhältnis von Korngröße zu Maschenweite, Art und Ausbildung der Trennfläche und die Kornform⁴⁶. Die Ermittlung der Konstante erfolgt experimentell unter Benützung von Gleichung (13) nach der Beziehung:

$$k = \ln \left(1 - \frac{\dot{m}_{F,D}}{\dot{m}_{F,A}} \right) \cdot \frac{v_T}{L} \quad (14)$$

Dazu siebt man eine Probe der Aufgabemasse $\dot{m}_A = \dot{m}_{G,A} + \dot{m}_{F,A}$ auf einem Sieb unter den der Praxis entsprechenden Siebbedingungen. Nach einer Sieblänge L ist Feingut $\dot{m}_{F,D}$ im Durchgang angefallen.

Sind die Geschwindigkeitskonstanten für die einzelnen Kornfraktionen und die Zusammensetzung des Siebguts bekannt, dann kann man die Siebleistung und Trennschärfe berechnen.

4.3.2 Sieben als Markovscher Prozess⁴⁷

Bei diesem Ansatz wird die Annahme getroffen, dass der Durchgangswiderstand durch die Siebmasche vernachlässigbar ist. Weiters wird davon ausgegangen, dass die Bewegung einer engen Feingutfraktion senkrecht zur Trennfläche im aufgelockerten Siebgut einem stochastischen Prozess Markovscher Art entspricht. Dieser ist annähernd durch die Differentialgleichung nach Fokker, Planck und Kolmogorov beschreibbar. Die Bewegung eines Teilchens durch die Gutschicht (Abbildung 19) wird durch die folgende Differentialgleichung beschrieben:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_z \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \pm S_z \cdot \frac{\partial W}{\partial z} \quad (15)$$

⁴⁶ vgl. Ferrara, 1988, S.210

⁴⁷ vgl. Meinel, 1974, S.52ff.

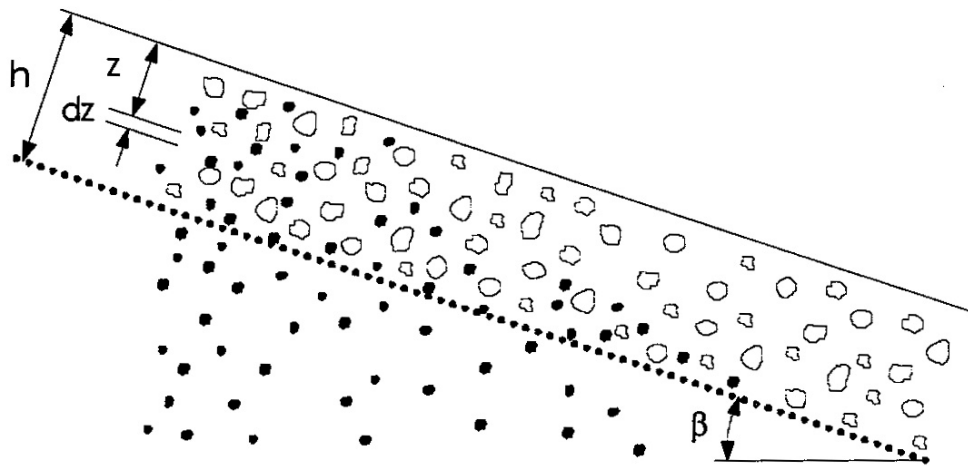


Abbildung 19: Bewegung der Teilchen durch die Gutschicht⁴⁸

Die Gleichung (15) beschreibt die Wahrscheinlichkeit W für die Lage z einer bestimmten Teilchengröße zur Zeit t . Der vorliegende Prozess besteht im Wesentlichen aus einem Diffusionsprozess und einem Entmischungsprozess, gekennzeichnet durch den Diffusionskoeffizient D_z und den Entmischungskoeffizient S_z . Der Diffusionsvorgang bewirkt eine zufällige Bewegung des Feinguts, durch welche dieses aus dem Bereich höherer in einen Bereich niedrigerer Konzentration transportiert wird und so einer Feingutverarmung in unmittelbarer Nähe der Sieböffnungen entgegen wirkt. Der Entmischungsprozess, auch Segregationsprozess genannt, wird durch die Einwirkung eines Potentialfeldes (Schwerkraft) hervorgerufen, wodurch das Feingut durch die Lücken des aufgelockerten Siebguts hindurch bewegt wird.

Beim oben genannten Verfahren zur Beschreibung der Kornbewegung gilt die Annahme, dass jedem Korn des Feinguts beim Erreichen der Trennfläche ein Durchgang mit einer Wahrscheinlichkeit $W = 1$ gelingt. Diese starke Vereinfachung ist jedoch vor allem für Grenzkörner nicht zulässig. Der Gesamtprozess wird daher in zwei Teilprozesse aufgeteilt. Der eine Teilprozess beschreibt die Feingutbewegung bis zur Trennfläche, der andere die Bewegung durch die Trennfläche. Mit Hilfe der Durchgangswahrscheinlichkeit W_{ges} , die sich aus der geometrischen Durchgangswahrscheinlichkeit W_G und der Wahrscheinlichkeit des Kornverklommens W_K zusammensetzt, wird die Feingutbewegung durch die Trennfläche beschrieben.

⁴⁸ Lange, 1997, S.24

$$W_{ges} = W_G \cdot (1 - W_K) \quad (16)$$

Sowohl W_G als auch W_K müssen für die einzelnen Kornfraktionen experimentell bestimmt werden.

4.4 Dimensionsanalytische Behandlung des Siebvorgangs⁴⁹

Die Dimensionsanalyse geht von den physikalischen Einflussgrößen des Siebvorgangs aus. Aus diesen werden dimensionslose Kennzahlen gebildet. Der Zusammenhang zwischen diesen Kennzahlen wird experimentell untersucht und ist für ähnliche Bedingungen allgemein gültig.

Als Zielgröße ist die abgesiebte Feingutmenge $\dot{m}_{F,D}$ bzw. der Siebgütegrad η von Interesse. Der Siebgütegrad bildet das Verhältnis der Massenströme von abgetrenntem Feingut $\dot{m}_{F,D}$ nach der Siebung und dem im Aufgabegut vorhandenen Feingut $\dot{m}_{F,A}$. Die Einflussgrößen, die auf die Zielgröße einen Einfluss haben, werden zweckmäßig nach Geometrie, Stoffeigenschaften und Betriebsbedingungen eingeteilt.

Geometrische Einflussgrößen: Maschenweite w , Drahtdicke d , Sieblänge L , Siebbreite B .

Stoffliche Einflussgrößen: mittlere Korngröße \bar{x} , Gleichmäßigkeitszahl n , mittlere Korndichte ρ , Stoßzahl k_{ST} , Kornform (Sphärizität) ψ , Klemmkornanteil Z_K . Noch berücksichtigt werden können der Reibbeiwert μ sowie die Feuchtigkeit Φ .

Betriebsbedingte Einflussgrößen: Schwingamplitude e , Winkelgeschwindigkeit ω , Siebneigung β , Aufgabemassenstrom \dot{m}_A , Erdbeschleunigung g .

Bei Wurfsieben mit linear gerichteten Schwingungen ist der frei wählbare Wurfinkel α noch zu berücksichtigen.

⁴⁹ vgl. Lange, 1997, S.29ff.

Die Einflussgröße Siebbreite kann man eliminieren, indem man den Aufgabemassenstrom \dot{m}_A durch diese dividiert.

$$\dot{m}_{A,B} = \frac{\dot{m}_A}{B} \quad (17)$$

Die Größen n , β , Z_K , k_{ST} und ψ sind nicht mit Einheiten behaftet, sind also bereits dimensionslose Kennzahlen. Entsprechend dem Buckingham-Theorem erhält man aus diesen insgesamt 15 Einflussgrößen 12 dimensionslose π -Kennzahlen. Ein zweckmäßiger Kennzahlensatz zur Beschreibung des Siebvorgangs auf kreisschwingenden Wurfsieben lautet somit:

$\pi_1 = d/w$	$\pi_2 = L/w$	$\pi_3 = \bar{x}/w$
$\pi_4 = e/w$	$\pi_5 = \dot{m}_{A,B}/\rho g^{0,5} w^{1,5}$	$\pi_6 = \eta = \dot{m}_{F,D}/\dot{m}_{F,A}$
$\pi_7 = K_V = e \omega^2/g \cos \beta$	$\pi_8 = n$	$\pi_9 = \beta \text{ bzw. } \cos \beta$
$\pi_{10} = k_{ST}$	$\pi_{11} = \psi$	$\pi_{12} = Z_K$

Von diesen Kennzahlen sind in der Praxis nur wenige frei wählbar. So sind in den meisten Fällen die Eigenschaften des Siebguts nicht frei wählbar. Weiters sind die Trennflächenparameter, wie Maschenweite und Drahtdicke, vorgegeben. Somit lässt sich der Kennzahlensatz um die Kennzahlen π_1 , π_3 , π_8 , π_{10} , π_{11} reduzieren. Sind die Siebguteigenschaften und die Beschaffenheit der Trennfläche vorgegeben, ist das Klemmverhalten nur bedingt beeinflussbar, so dass die Kennzahl π_{12} als konstant angesehen werden kann. Das Klemmkorn bewirkt, dass die Sieblänge L , durch die effektiv am Klassierprozess beteiligte Sieblänge L_{eff} , ersetzt wird. Die beim Sieben beeinflussbaren Parameter sind somit auf insgesamt sechs Kennzahlen begrenzt, von denen die Kennzahl π_6 die Zielgröße ist. Durch Siebversuche wird die Zielgröße unter dem Einfluss der variablen Parameter ermittelt. Daraus kann eine Funktion aufgestellt werden, die den Siebprozess allgemein gültig für ähnliche Bedingungen beschreibt.

5 Wurfsiebe

Wurfsiebe sind die, von den verschiedenen Bauarten der Siebmaschinen am weitesten verbreiteten. Bei den meisten Wurfsiebkonstruktionen schwingt der komplette Siebkasten, während bei einigen Bauarten, die für Fein- und Feinstkornabsiebungen eingesetzt werden, nur der Siebboden zu Schwingungen angeregt wird. Bei der zuerst genannten Gruppe unterscheidet man je nach Schwingungsbahn zwischen Kreisschwinger, Linearschwinger und Ellipsenschwinger (Abbildung 20), wobei aber die Ellipsenschwinger von untergeordneter Bedeutung sind. Bei der Antriebsart unterscheidet man zwischen Zwangsantrieb (hubbegrenzt) und Massenkraftantrieb (kraftbegrenzt). Auch die Erregerfrequenz relativ zur Eigenfrequenz des Siebkastens ist für die Einteilung von Bedeutung. Man unterscheidet unterkritisch, kritisch oder überkritisch schwingende Siebmaschinen, je nachdem ob die Erregerfrequenz unter, im oder über dem Resonanzbereich liegt.

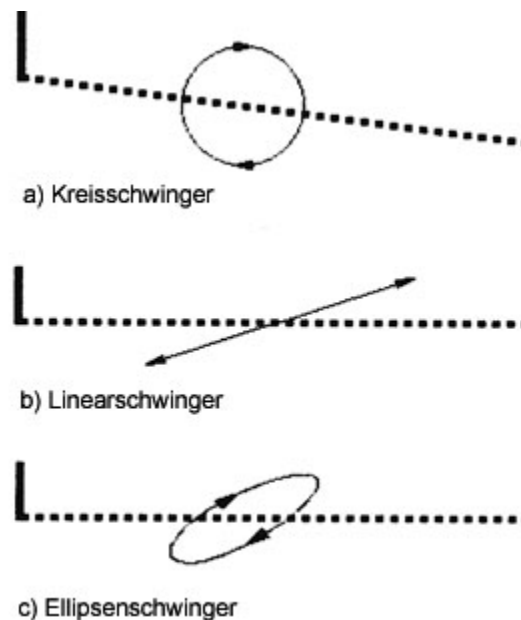


Abbildung 20: Verschiedene Typen von Wurfsieben⁵⁰

⁵⁰ vgl. Stieß, 2009, S.302

5.1 Kreisschwinger

Zu den wichtigsten Kreisschwingern gehören die Exzenterwingsiebe und die Kreiswuchtschwingsiebe (Abbildung 21).

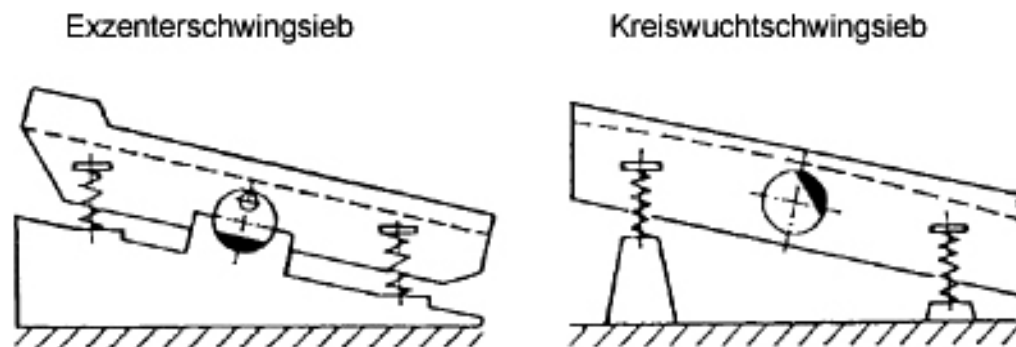


Abbildung 21: Kreisschwingsiebe, schematisch⁵¹

Exzenterwingsiebe verfügen über eine zentral angeordnete Exzenterwelle (Abbildung 22).

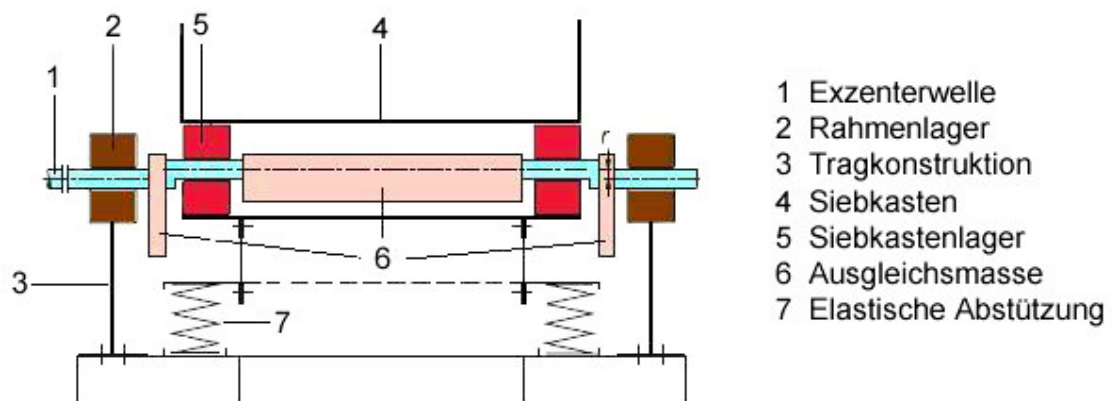


Abbildung 22: Prinzip eines Exzenterwingsiebes⁵²

Die Exzenterwelle läuft in der Lagerpaarung der Tragkonstruktion. Die am Siebkasten befestigten Lager werden vom Exzenter mit dem Radius r zwangsläufig geführt. Der Siebkasten ist elastisch abgestützt und die bei der Bewegung der

⁵¹ vgl. Schubert, 2003, S.525

⁵² vgl. FAG, 2011, S.10

Siebkastenmasse m_S ausgelösten Zentrifugalkräfte werden durch die Ausgleichsmasse m_a ausgeglichen, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$m_a \cdot r_a = m_S \cdot r \quad (18)$$

Dadurch werden die Rahmenlager entlastet, die Siebkastenlager müssen jedoch die vollen Massenkräfte aufnehmen. Die Exzentrizität der Welle ist den Erfordernissen des jeweiligen Siebprozesses anzupassen. Um Nickschwingungen infolge der elastischen Abstützung zu vermeiden, sollte die Betriebsfrequenz ein Mehrfaches der Eigenfrequenz der Nickschwingungen betragen. In Abhängigkeit vom Siebgut und dem gewünschten Trennergebnis sollte die Neigung des Siebbodens zwischen 12° und 25° liegen⁵³.

Bei den Kreiswuchtschwingsieben ist die zentrale Welle nur im Siebkasten, nicht aber auf dem Grundrahmen gelagert (Abbildung 23).

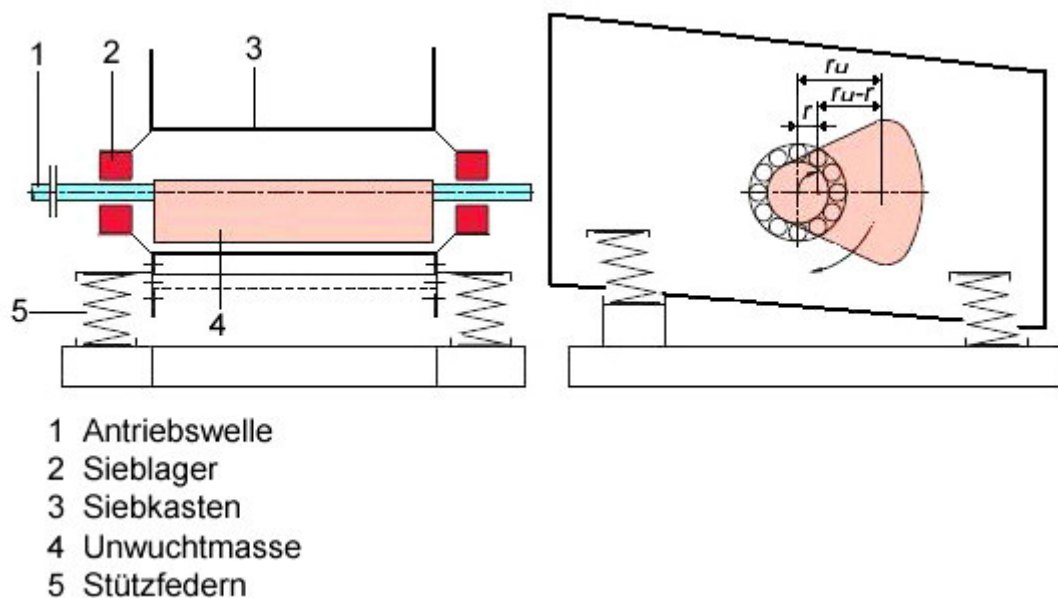


Abbildung 23: Prinzip eines Kreiswuchtschwingsiebes⁵⁴

Der Antrieb erfolgt durch eine umlaufende Unwuchtmasse, die meist im Schwerpunkt des Siebkastens gelagert ist. Dieser wird auf relativ weichen Federn so abgestützt, dass in allen Richtungen nahezu gleiche Rückstellkräfte wirken. Kann man die Federkonstanten vernachlässigen, so rotieren

⁵³ vgl. Schubert, 2003, S.525

⁵⁴ vgl. FAG, 2011, S.7

Siebkastenmasse m_s und Unwuchtmasse m_u um den gemeinsamen Schwerpunkt. Das System zentriert sich von selbst, wobei gilt:

$$m_u \cdot (r_u - r) \cong m_s \cdot r \quad (19)$$

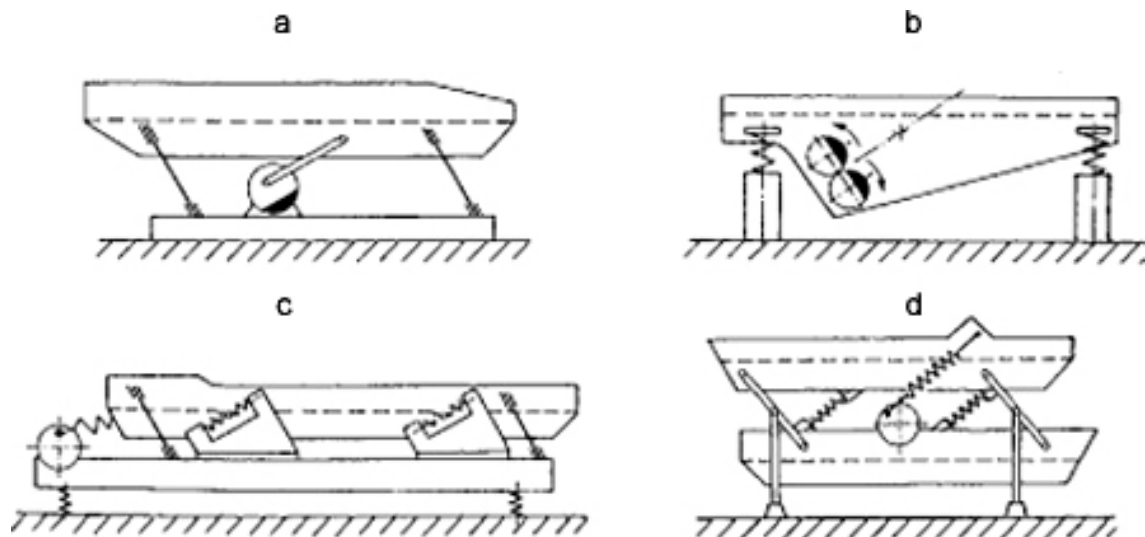
Während bei den Exzentrersiebmaschinen der Bewegungsablauf der Siebkastenschwingung durch die Geometrie des hubbegrenzten Antriebssystems bestimmt wird, handelt es sich bei den Kreiswuchtschwingsieben um ein freischwingendes, kraftbegrenztes System (Freischwinger). Kreiswuchtschwingsiebe werden überkritisch bei etwa $\omega/\omega_0=3-6$ betrieben⁵⁵. In diesem Bereich ist annähernd eine gleichbleibende Schwingungsweite, auch bei gewissen Änderungen der Erregerfrequenz und der Belastung, gewährleistet. Damit es nicht zum Aufschaukeln kommt, muss die Eigenfrequenz schnell durchfahren werden. Der Vorteil dieser Siebe liegt in der einfachen Bauweise (im Vergleich zu Exzentrerschwingsieben nur ein Lagerpaar notwendig) und in der Anpassungsfähigkeit der Schwingungsweite durch Veränderung der Unwuchtmasse bzw. deren Verstellung. Eine ausreichende Fördergeschwindigkeit des Siebguts ist nur bei entsprechender Siebbodenneigung von etwa 10° bis 25° gewährleistet⁵⁶.

5.2 Linearschwinger

Bei den älteren Bauarten von Linearschwingern ist die Siebkastenbewegung vorwiegend von Pendelfedern geführt, so dass sich Bogenschwingungen ergeben, die bei kleiner Amplitude bzw. langen Pendelfedern einer Linearschwingung nahe kommen. Dazu zählen auch die verschiedenen Bauarten von Resonanzsieben, die jedoch inzwischen in der modernen Siebtechnik an Bedeutung verloren haben. In den letzten Jahrzehnten haben sich eindeutig Bauarten durchgesetzt, bei denen der elastisch gelagerte Siebkasten durch ein Doppelunwuchtsystem zu linearen Schwingungen angeregt wird. In Abbildung 24 sind vier Linearschwinger dargestellt.

⁵⁵ vgl. Höffl, 1986, S.313

⁵⁶ vgl. Schubert, 2003, S.526



- a) Schubkurbelschwingsieb
 b) Doppelwuchtschwingsieb
 c) Resonanzsieb mit elastisch gekoppeltem Abtrieb, Zweimassensystem
 d) Resonanzsieb mit elastisch gekoppeltem Abtrieb, Doppel-Einmassensystem mit vollem Ausgleich der freien Kräfte

Abbildung 24: Linearschwingsiebe, schematisch⁵⁷

Bei den Schubkurbelschwingsieben (Abbildung 24a) wird die Drehbewegung des fest gelagerten Antriebs über eine exzentrisch angeordnete Schubstange auf den an Lenkerfedern hängenden oder abgestützten Siebkasten übertragen. Die Schubstange wird senkrecht zu den Lenkerfedern geführt. Weil bei dieser Anordnung der Massenausgleich nur teilweise möglich ist, sind nur Maschinenkennzahlen bis etwa $K = 2$ anwendbar⁵⁸. Diese Siebmaschinen sind heute für industrielle Absiebungen nahezu bedeutungslos.

Resonanzsiebe sind dadurch gekennzeichnet, dass der mit Puffersystemen gekoppelte Siebkasten im Bereich seiner Eigenfrequenz schwingt, so dass vom Antrieb im Wesentlichen nur die Reibungs- und Dämpfungsverluste auszugleichen sind. Der Antrieb ist im Allgemeinen über weiche Federn gekoppelt. Die kinetische Energie des Siebkastens wird mit der potentiellen Energie von Federn, Gummipuffern oder Kombinationen beider ständig ausgetauscht. Diese Kopplungen müssen hohe Rückstellkräfte aufweisen. Dies ermöglicht das Aufrechterhalten der Siebfrequenz, der Amplitude und der Phasendifferenz auch bei Schwankungen der wirksamen Massen, die sich im Betrieb in gewissen

⁵⁷ Schubert, 2003, S.529

⁵⁸ vgl. Höffl, 1986, S.320

Grenzen durch unterschiedliche Belastungen nicht vermeiden lassen. In Abbildung 24c ist ein Zweimassensystem schematisch dargestellt. Der Siebkasten ist mit Lenkern, die gegen die Horizontale geneigt sind, auf dem Grundrahmen befestigt. Die Kopplungselemente dieser beiden schwingenden Massen - Federn und Gummipuffer - sind auf beiden Seiten in Führungen untergebracht, die mit dem Grundrahmen starr verbunden sind. Ein voller Ausgleich der freien Kräfte ist bei der in Abbildung 24d dargestellten Siebmaschine vorhanden. Zwei Siebkästen sind übereinander angeordnet, werden von Lenkern geführt und schwingen gegensinnig zueinander. Der Antrieb befindet sich auf dem unteren Siebkasten und treibt mit elastischer Koppelung den oberen an. Die Lenker sind in der Ebene des gemeinsamen Massenmittelpunktes auf Tragrohren gelagert, wodurch die Abstützung ohne freie Kräfte möglich ist. Resonanzsiebe sind inzwischen weitgehend von den Doppelwuchtsieben verdrängt worden, weil diese ebenfalls mit sehr großen Siebflächen hergestellt werden können, wobei ihre Gesamtmasse und der Aufwand für Wartung und Instandhaltung wesentlich geringer als bei Resonanzsieben ist.

Beim Doppelwuchtschwingsieb (Abbildung 24b) ist der Schwingungserreger ein sogenannter Richterregger, der aus zwei Paaren von Unwuchtmassen besteht, die entweder durch Zahnradpaare gekoppelt oder auf andere Weise synchronisiert sind und deshalb mit gleicher Drehzahl, aber gegensinnig rotieren. Das Antriebsprinzip verdeutlicht Abbildung 25.

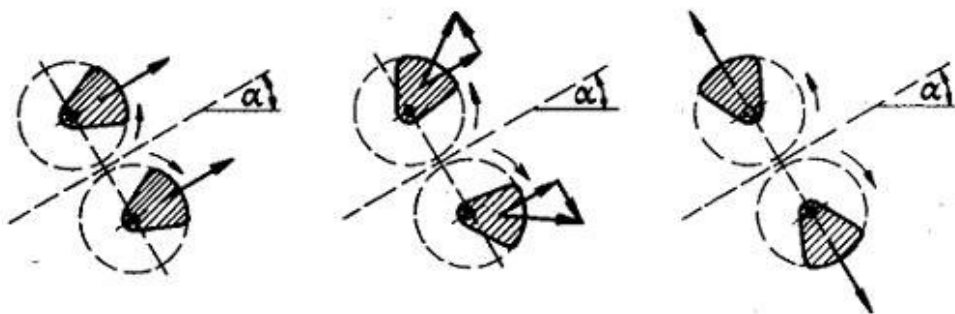


Abbildung 25: Linearschwinger - Doppelunwuchtprinzip⁵⁹

⁵⁹ Schmidt, 2003, S.40

Die in Schwingungsrichtung (Wurfwinkel α) wirkenden Kraftkomponenten der rotierenden Unwuchten addieren sich und erzeugen eine harmonisch pulsierende Massenkraft, die den Siebkasten in lineare Schwingungen versetzt. Die senkrecht dazu wirkenden Komponenten heben sich gegenseitig auf. Wie bei den Kreiswuchtsiebmaschinen handelt es sich hier um ein freischwingendes, kraftbegrenztes System. Der Wurfwinkel α ist durch die Stellung des Richters vorgegeben. Doppelwuchtschwingsiebe arbeiten überkritisch. Sie sind robust und hinsichtlich des Schwingungsradius anpassungsfähig. Ihr Einsatzbereich erstreckt sich über einen großen Teil des Anwendungsfeldes der Siebklassierung (von grob bis fein, trocken und nass, schonend bis scharf).

5.3 Siebböden

Die Siebtechnik verfügt über eine große Anzahl von Siebbodenausführungen. Diese unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Form der Sieböffnungen, der offenen Siebfläche, der Durchgangsquerschnitte, der Herstellungsart und des verwendeten Werkstoffes.

Folgende Forderungen werden an die verschiedenen Siebarten gestellt⁶⁰:

- Große offene Siebfläche
- Geringer Durchgangswiderstand und gute Reinigungswirkung
- Geringer Verschleiß durch verschleißfeste Siebbodenwerkstoffe
- Gute Befestigungsmöglichkeit
- Leichte Wechselbarkeit
- Geringe Lärmentwicklung und geringe Herstellungstoleranzen

Die Wahl des richtigen Siebbelags richtet sich nach den Eigenheiten des Siebguts, der gewünschten Trennkorngröße und Trennschärfe, dem Durchsatz sowie den betrieblichen Rahmenbedingungen. Sieböffnungen weisen vornehmlich die in Abbildung 26 dargestellten geometrischen Formen auf. Die Öffnungsform hat wesentlichen Einfluss auf das Trennergebnis, insbesondere bei siebschwierigem Gut, und im Grenzkornbereich. Führt man auf diesen vier

⁶⁰ vgl. Höffl, 1986, S.294

Öffnungsformen Absiebungen bei gleichbleibender Öffnungsweite w aus, so gilt für die Trennkorngröße d_T^{61} :

$$(d_T)_{\text{rund}} < (d_T)_{\text{quadratisch}} < (d_T)_{\text{langförmig}} < (d_T)_{\text{spaltförmig}}$$

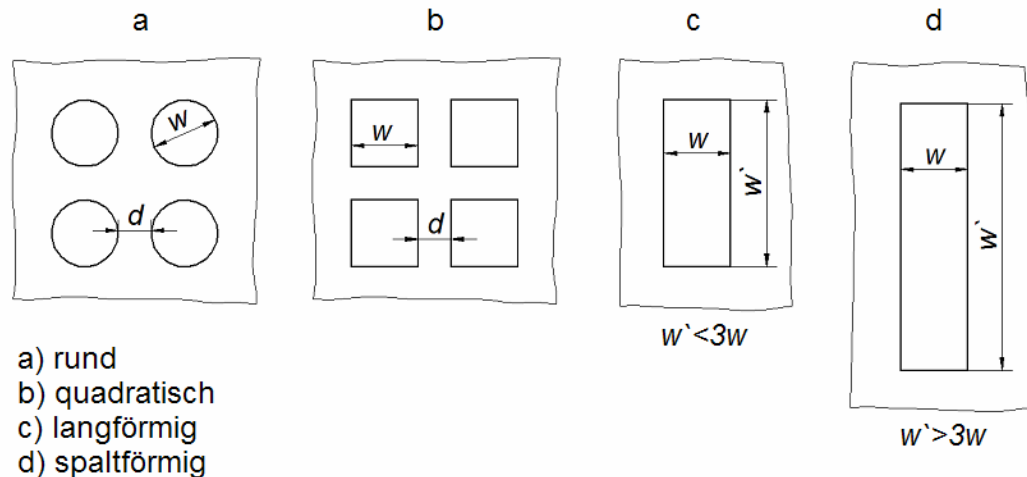


Abbildung 26: Formen von Sieböffnungen⁶²

Die relativ offene Siebfläche ist für den Durchsatz und die Trennschärfe bedeutungsvoll. Sie wird aus dem Verhältnis der Summe aller Flächen der Sieböffnungen zur Gesamtfläche des Siebbodens gebildet. Für quadratische Sieböffnungen (Abbildung 26b) ergibt sich⁶³:

$$A_0 = \frac{A_{\text{offen}}}{A_{\text{Sieb}}} = \frac{w^2}{(w + d)^2} \quad (20)$$

Das Verhältnis w/d , das für die Größe der offenen Siebfläche wesentlich ist, wird vor allem von den Beanspruchungen bestimmt, denen der Siebboden ausgesetzt ist. Die Siebfläche hat nicht nur die Last des Siebguts zu tragen, sondern darüber hinaus zusätzlich Beanspruchungen aufzunehmen, die durch die Bewegung der Siebmaschine und des Siebguts verursacht werden. Der Siebboden muss so beschaffen sein, dass er diesen Beanspruchungen standhält und der Werkstoff auch nicht bei den auftretenden Wechselbeanspruchungen vorzeitig ermüdet. In diesem Zusammenhang ist die Werkstoffwahl von großer

⁶¹ vgl. Höfl 1986, S.295

⁶² vgl. Schubert, 1989, S.208

⁶³ vgl. Meinel, 2005, S.17

Bedeutung. Während sich im Bereich der Grob- und Mittelkornabsiebungen noch relativ günstige Werte für die offene Siebfläche erzielen lassen, entstehen mit abnehmender Sieböffnungsweite wachsende Probleme.

Verschiedene Ausbildungsformen von Durchgangsquerschnitten sind in Abbildung 27 dargestellt. Der Durchgangsquerschnitt beeinflusst vor allem das Passieren des Grenzkorns. Die Profile c, d und e sind am günstigsten, da sich die Querschnitte nach unten erweitern. Trotzdem sind Runddrahtgewebe am meisten verbreitet, weil sie sich am einfachsten fertigen lassen.

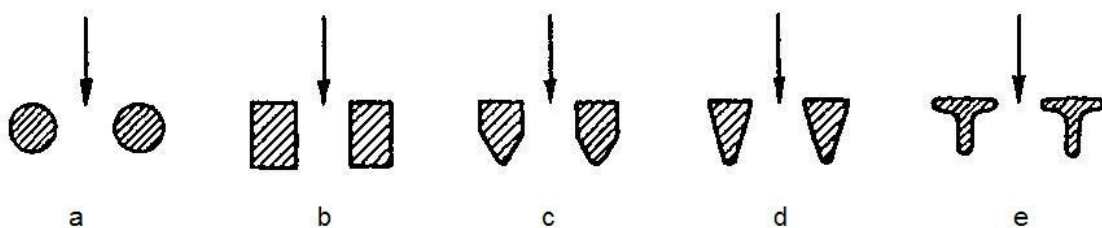


Abbildung 27: Durchgangsquerschnitte⁶⁴

Im Nachfolgenden werden wichtige Siebbodenarten (siehe Abbildung 28) kurz vorgestellt⁶⁵:

Gelochte Siebböden (Plattensiebböden) aus Stahl sind Bleche mit gestanzten, gebohrten, gefrästen, mit Laser- oder Wasserstrahl geschnittenen Sieböffnungen. Bei gelochten Siebböden aus Gummimatten werden die Sieböffnungen entweder gestanzt oder bei der Herstellung durch Vulkanisieren in der Form berücksichtigt. Polyurethan-Plattensiebböden werden durch Gießen in entsprechende Formen hergestellt und sind in verschiedenen Ausführungsformen erhältlich. Gummimatten bzw. Polyurethan-Beläge zeichnen sich durch hohe Lebensdauer, geringeren Geräuschpegel und gute Selbstreinigung im Vergleich zu gelochten Stahlböden aus. Plattensiebböden weisen meist runde, quadratische oder langförmige Sieböffnungen auf. Die Plattendicke soll möglichst gering sein, um das Passieren insbesondere des Grenzkorns nicht zu erschweren. Die glatte Oberfläche der Böden ist für den Siebguttransport vorteilhaft. Das

⁶⁴ Schubert, 1989, S.209

⁶⁵ vgl. Schubert, 2003, S.520ff.

Einsatzgebiet der gelochten Siebböden sind vor allem Grob- bis Mittelkornabsiebung.

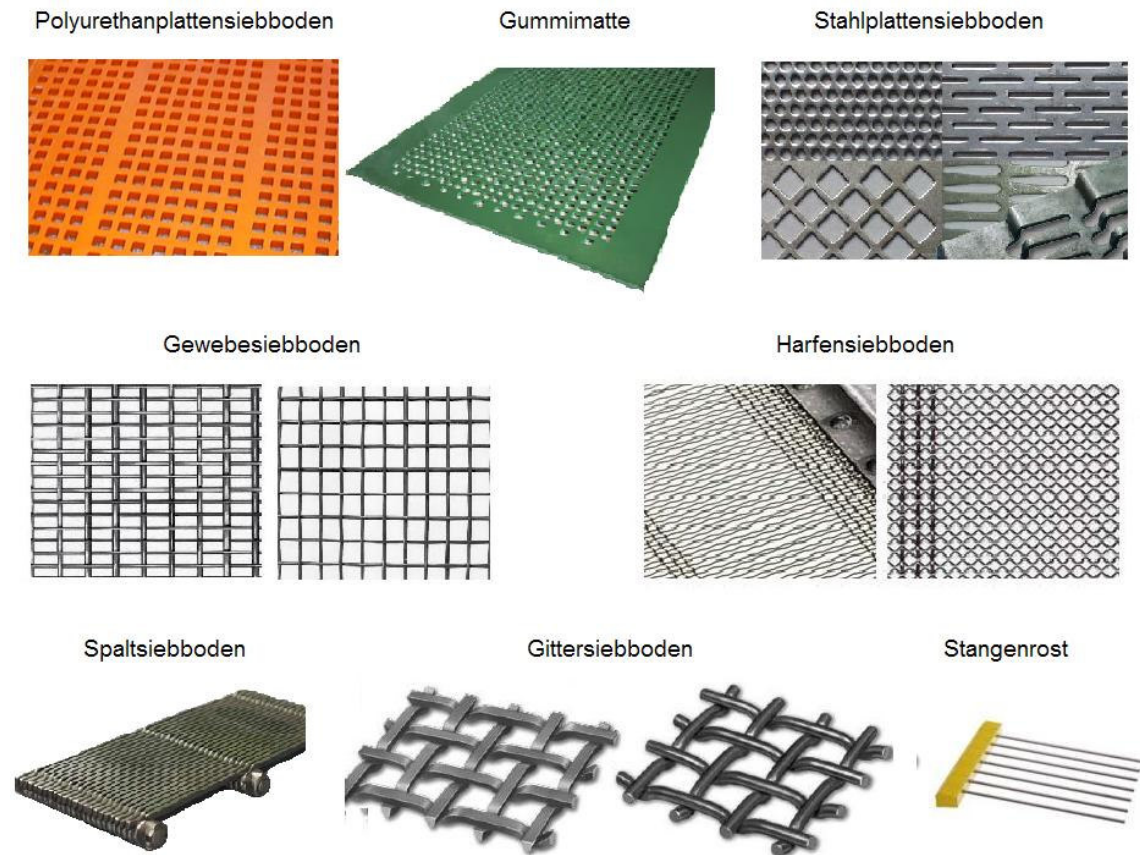


Abbildung 28: Übersicht verschiedener Siebbodenarten⁶⁶

Gewebesiebböden bestehen aus verwebten Drähten (rund oder auch profiliert). Sie besitzen vorwiegend quadratische oder langförmige Sieböffnungen. Quadratmaschengewebe sind für Siebgüter, die ein leichtes Zusetzen der Sieböffnungen bewirken, wenig geeignet. Mit langförmigen Sieböffnungen sind diese Schwierigkeiten geringer. Für schnell schwingende Siebe werden die Gewebe aus Federstahldrähten hergestellt. Gewebesiebböden finden für Mittel- bis Feinstkornabsiebungen Anwendung.

Harfensiebböden bestehen aus glatten, senkrecht zur Siebebene gewellten oder in der Siebebene gewellten Längsdrähten, die durch eingewebte Querdrahtlagen oder auch Klammern so verbunden sind, dass spaltartige Sieböffnungen entstehen. Um eine ausreichende Steifigkeit zu verwirklichen, ist

⁶⁶ vgl. Meinel, 2005, S10ff.

eine kräftige Längsspannung erforderlich. Harfensiebe besitzen eine relativ große, offene Siebfläche. Sie begünstigen die Ausbildung von Oberschwingungen, die dem Zusetzen der Siebfläche entgegenwirken (Zerreißen von Flüssigkeitsbrücken, Auswerfen von Klemmkorn). Allerdings ist die Trennschärfe gewöhnlich schlechter als die von Quadratmaschensieben.

Bei Spaltsiebböden sind Profildrähte auf starke Querstäbe aufgezogen. Die Spalten zwischen den Längsdrähten bilden die Durchgangsöffnungen. Auf diese Weise können sehr stabile Siebböden bis zu Spaltweiten von 0,05 mm hergestellt werden. Die offene Siebfläche ist allerdings relativ gering.

Gittersiebböden werden aus gekröpftem Rund- oder Profildraht hergestellt und stellen eine schwere Bauart der Gewebesiebböden dar. Durch die Kröpfung an den Drahtkreuzpunkten entsteht eine glatte Trennfläche, die günstige Trennbedingungen gewährleistet. Ihr Einsatzgebiet liegt in der Grob- bis Mittelkornabsiebung.

Stangenroste bestehen aus zylindrischen an Querträgern befestigten Stäben. Sie werden meist stufenförmig angeordnet und bewirken eine gute Auflockerung des Siebguts. Dabei werden hohe Durchsätze, jedoch unter verminderter Trennschärfe, erzielt. Stangenroste werden für siebschwierige Güter in der Mittel- und Grobkornklassierung eingesetzt.

Die ordnungsgemäße Befestigung von Siebböden auf ihrer Unterlage ist von größter Bedeutung. Ein Siebboden muss die Bewegung des Siebkastens mitmachen und darf sich nicht von der Stützkonstruktion (Unterzüge) lösen. Ein nur locker niedergehaltener Siebboden würde Eigenbewegungen vollführen (flattern) und nach kurzer Zeit bei den Aufschlagstellen brechen. Es ist zwischen spannbaren Siebböden und Befestigungssiebböden zu unterscheiden. Die spannbaren Siebböden (vor allem Gewebesiebböden) lassen sich in Längs- und Querspanner untergliedern. Der Siebbelag wird dabei an die überhöhte Unterstützkonstruktion angepresst. Die Befestigungssiebböden werden auf ebene Unterstützkonstruktionen aufgelegt und mit Niederhaltern befestigt.

6 Grundmodell für den Siebvorgang

Als Referenz für das mathematisch physikalische Siebmodell wird ein Linear-schwingsieb herangezogen. Es handelt sich um ein Doppelwuchtschwingsieb. Dieser Siebtyp wird von der Firma Plasser & Theurer produziert und ist bei verschiedenen Bettungsreinigungsmaschinen im Einsatz.

6.1 Aufbau

Das Sieb besteht aus 3 Siebdecks (Abbildung 29) mit jeweils einer Breite von 1,9m. Die effektive Sieblänge vom 1.Deck beträgt 4,1m, vom 2.Deck 4m und vom 3.Deck 3,9m. Bei allen drei Siebebenen werden Gittersiebflächen mit Quadratmaschen verwendet. Im 1.Deck wird das Grobkorn abgeschieden. Das Mittelkorn wird im 2.Deck gewonnen. Im 3.Deck wird das Restkorn vom Abraum getrennt und das Feinkorn gewonnen. Das Sieb ist auf Stützfedern gelagert und so vom Rahmen entkoppelt. Der Antrieb erfolgt hydraulisch. Der Hydraulikmotor treibt die zwei Unwuchtwellen, die über ein Zahnradpaar gekoppelt sind, an.

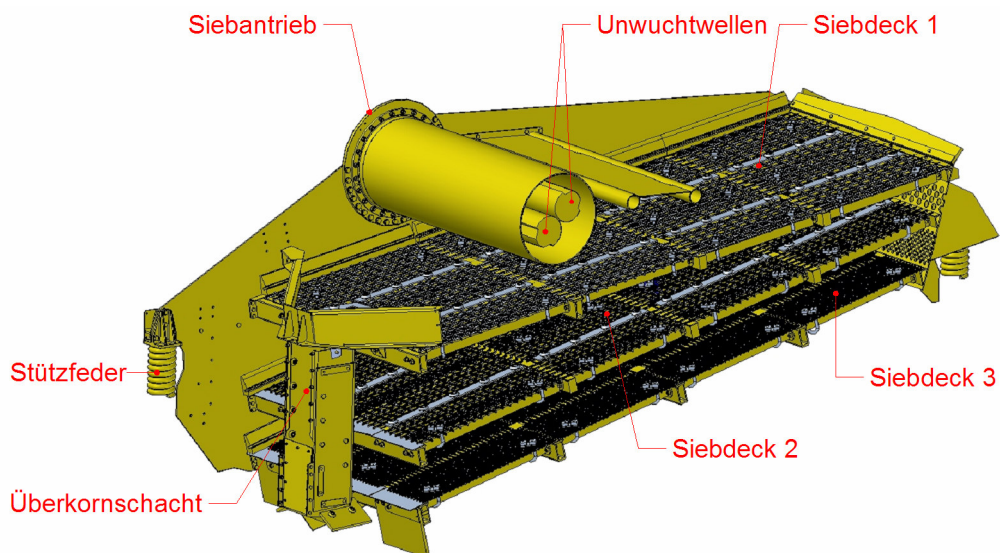


Abbildung 29: 3D-Schnitt durch ein Doppelwuchtschwingsieb

6.2 Kenndaten

Die Sieb-Untersuchungen wurden mit der Reinigungsmaschine RM80-VRCh1, Maschinen-Nr. 230 durchgeführt. Vom darauf aufgebauten Linearschwingsieb (P&T Zeichnungs-Nr. 64.09.1000.66) werden die relevanten Daten für das Siebmodell übernommen.

- Gesamtmasse Sieb: 6950 kg
- Masse je Unwuchtwelle 411 kg
- Unwuchtradius 41 mm
- Betriebsdrehzahl 1200 U/min

6.2.1 Maschenweite

Die Siebbodenelemente bestehen aus einem Profildraht (Abbildung 30) der mittels Leinenbindung zu einem Drahtgitter geflochten wird. Die Maschenweiten der einzelnen Siebdecks betragen:

- Siebdeck 1: 80 mm, Profil-Nr. H15
- Siebdeck 2: 55 mm, Profil-Nr. H10
- Siebdeck 3: 35 mm, Profil-Nr. H8

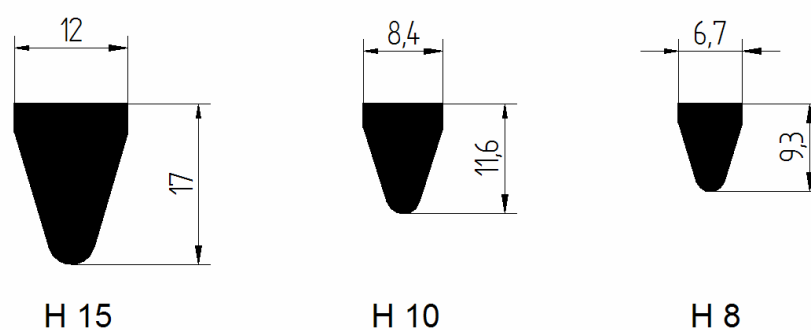


Abbildung 30: Querschnitte Profildraht

6.2.2 Siebbodenneigung

Die Siebböden haben folgenden Neigungswinkel β :

- Siebdeck 1: 9°
- Siebdeck 2: 12°
- Siebdeck 3: 13°

6.2.3 Wurfwinkel

Der Wurfwinkel α ist durch die Lage des Siebantriebs vorgegeben. Er ist auf 45° gegenüber der Horizontalen eingestellt. Der Kraftvektor des Antriebs geht durch den Schwerpunkt des Siebes um keine zusätzlichen Momente zu erzeugen.

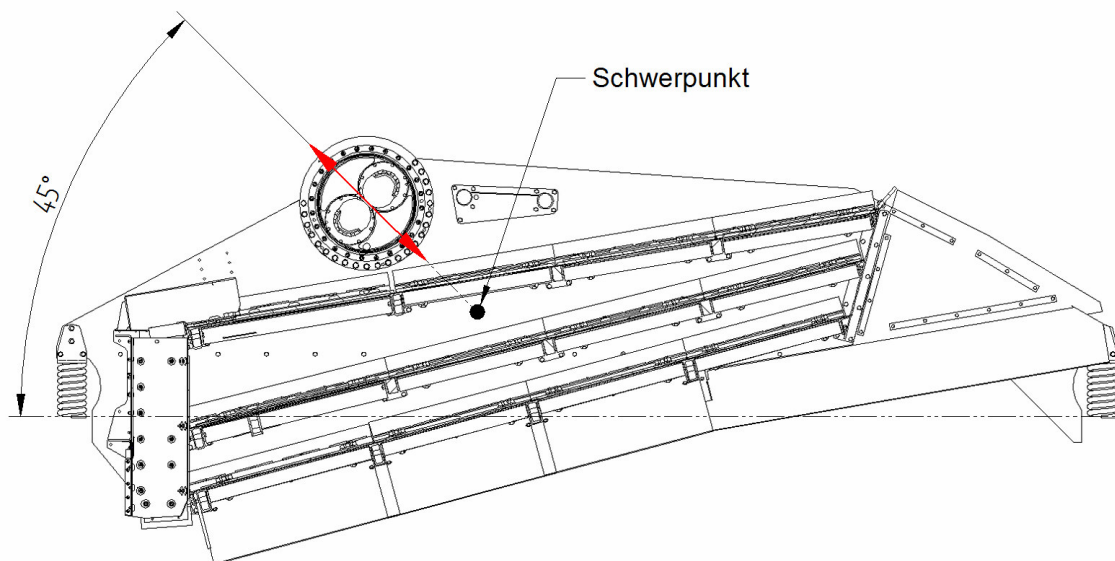


Abbildung 31: Wurfwinkeleinstellung

7 Praktische Untersuchungsergebnisse

Die Siebuntersuchungsergebnisse (Anhang I) stammen aus dem Jahr 1984 von der Strecke Mühlkreisbahn. Wie schon in Kapitel 6.2 erwähnt, wurde der Versuch mit der Reinigungsmaschine RM80-VRCh1, Maschinen-Nr. 230 durchgeführt. Es wurde die Kornzusammensetzung des gereinigten Schotters und der Bettungsrückstände gemessen. Für die Kornzusammensetzung des ungereinigten Schotters liegen keine Messwerte vor. Die Werte dafür werden unter der Annahme eines Verschmutzungsgrades von 30 Gewichtsprozent aus den Messwerten des gereinigten Schotters und der Bettungsrückstände ermittelt. Die in den Tabellen 3-5 vorgenommene Unterteilung der Korngrößen in Fraktionen erfolgt zweckmäßig für die Berechnung und unterscheidet sich von den Siebuntersuchungsergebnissen. Die gemessenen Massenanteile der einzelnen Fraktionen sind prozentuell in die neue Unterteilung umgerechnet worden.

Tabelle 3: Kornzusammensetzung des gereinigten Schotters

Siebfraktion [mm]	Massenanteile		Siebdurchgang	
	[kg]	[%]	Sieböffnung	[%]
< 8,0	0,72	0,89		
8,0-16,0	0,72	0,89	8,0	0,89
16,0-22,4	0,58	0,71	16,0	1,78
22,4-31,5	4,75	5,84	22,4	2,49
31,5-40,0	24,18	29,76	31,5	8,33
40,0-50,0	23,70	29,17	40,0	38,09
50,0-63,0	19,16	23,58	50,0	67,26
> 63	7,44	9,16	63,0	90,84
Σ	81,25	100	> 63,0	100

Tabelle 4: Kornzusammensetzung der Bettungsrückstände

Siebfraktion [mm]	Massenanteile		Siebdurchgang	
	[kg]	[%]	Sieböffnung	[%]
< 8,0	26,19	51,58		
8,0-16,0	6,06	11,94	8,0	51,58
16,0-22,4	5,34	10,51	16,0	63,52
22,4-31,5	5,42	10,67	22,4	74,03
31,5-40,0	3,91	7,70	31,5	84,70
40,0-50,0	1,83	3,60	40,0	92,40
50,0-63,0	1,49	2,94	50,0	96,00
> 63	0,54	1,06	63,0	98,94
Σ	50,78	100,00	> 63,0	100,00

Die Kornzusammensetzung des ungereinigten Schotters wird aus der Summe der Massenanteile des gereinigten Schotters und der Bettungsrückstände gebildet.

Tabelle 5: Kornzusammensetzung des ungereinigten Schotters

Siebfraktion [mm]	Massenanteile		Siebdurchgang	
	[kg]	[%]	Sieböffnung	[%]
< 8,0	26,91	20,38		
8,0-16,0	6,78	5,14	8,0	20,38
16,0-22,4	5,92	4,48	16,0	25,52
22,4-31,5	10,17	7,70	22,4	30,00
31,5-40,0	28,09	21,28	31,5	37,70
40,0-50,0	25,53	19,34	40,0	58,98
50,0-63,0	20,65	15,64	50,0	78,32
> 63	7,98	6,04	63,0	93,96
Σ	132,03	100,00	> 63,0	100,00

Aus Tabelle 5 kann man den Verschmutzungsgrad von 30 Gewichtsprozent herauslesen (prozentueller Anteil des Siebdurchgangs durch die 22,4mm Sieböffnung).

8 Berechnung und Kalibration des Modells

In den Kapiteln 4.3 und 4.4 wurden einige Methoden vorgestellt um den Siebprozess angenähert zu berechnen. Es sind jedoch bei allen Varianten experimentelle Daten notwendig um ein entsprechendes Ergebnis zu bekommen. Da jedoch in dieser vorliegenden Arbeit kein Versuchsaufbau mit einem Schwing-sieb möglich ist, wird der Siebprozess rein theoretisch behandelt.

8.1 Berechnungsansatz

Da es bei einer Reaktion 1.Ordnung, wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, nur eine unbekannte Größe, nämlich die Geschwindigkeitskonstante k zu ermitteln gilt, wird dieser Ansatz näher verfolgt. Es gilt daher, auf theoretischem Weg eine Konstante zu finden, die mit der Geschwindigkeitskonstante k vergleichbar ist und ebenfalls die auf den Siebprozess beeinflussenden Parameter enthält.

In den folgenden Betrachtungen und für die Berechnung des Siebmodells wird von der Einzelkorndynamik ausgegangen. Beim Sieben einer Mehrkornschicht wird daher die Annahme getroffen, dass die Maschinenparameter einen ähnlichen Einfluss wie beim Sieben eines Einzelkorns ausüben.

Die Durchgangswahrscheinlichkeit eines Einzelkorns lässt sich für n Wurfvorgänge mit folgender Exponentialfunktion ausdrücken⁶⁷:

$$W_n = 1 - \exp(-k_n) \quad (21)$$

mit der Konstanten

$$k_n = -n \cdot \ln(1 - W_E) \quad (22)$$

und der Wahrscheinlichkeit W_E für das Passieren der Masche nach Gleichung (8).

⁶⁷ vgl. Jansen, 1967, S.341

Die Wahrscheinlichkeitstheorie besagt, dass der Siebgütegrad η mit der Wahrscheinlichkeit für den Durchgang einer Kornklasse ins Feingut identisch ist. Daraus folgt⁶⁸:

$$W_n = \eta = \frac{\dot{m}_{F,D}}{\dot{m}_{F,A}} \quad (23)$$

Da es sich bei dem Siebmodell um einen kontinuierlichen Siebvorgang handelt, ist es zweckmäßig die Anzahl der Auftreffereignisse n pro Längeneinheit L anzugeben. Für die in der Praxis vorherrschende Dickschichtsiebung wird die Wahrscheinlichkeit W_E ersetzt durch die Gesamtwahrscheinlichkeit W_{ges} , die für die Dickschichtsiebung relevant ist. Es folgt aus Gleichung (22) für die Siebkonstante k_L :

$$k_L = -\frac{n}{L} \cdot \ln(1 - W_{ges}) = -n_L \cdot \ln(1 - W_{ges}) \quad (24)$$

Aus Gleichung (21) folgt durch Einsetzen der Gleichungen (23 und 24) für den Feingutanteil, der nach einer bestimmten Länge ausgesiebt wurde:

$$\dot{m}_{F,D} = \dot{m}_{F,A} \cdot [1 - \exp(-k_L \cdot L)] \quad (25)$$

Somit ergibt sich für den kinetischen Prozess 1.Ordnung des kontinuierlichen Siebvorgangs folgende Differentialgleichung⁶⁹:

$$-\frac{d\dot{m}_F}{dL} = k_L \cdot \dot{m}_F \quad (26)$$

Gleichung (26) ist vergleichbar mit Gleichung (10). Die Siebzeit t wurde durch die Sieblänge L ersetzt und anstelle der experimentell zu bestimmenden Geschwindigkeitskonstante k wird die theoretisch zu ermittelnde Siebkonstante k_L verwendet.

⁶⁸ vgl. Lange, 1997, S.76

⁶⁹ vgl. Standish, 1985b, S.166

Die Siebkonstante k_L beinhaltet, wie die Geschwindigkeitskonstante k , die auf den Siebprozess beeinflussenden Parameter. Die Anzahl der Auftreffereignisse hängt in erster Linie von der Fördergeschwindigkeit ab. Diese wiederum hängt von den einzelnen Maschinenparametern wie Frequenz, Amplitude, Neigungswinkel des Siebbodens und Wurfwinkel ab. Eine hohe Anzahl von günstigen Auftreffereignissen verbessert das Klassierergebnis. Die Fördergeschwindigkeit wird über die gesamte Sieblänge als konstant angenommen. Ebenfalls in der Siebkonstante enthalten ist die Gesamtwahrscheinlichkeit W_{ges} für die Dickschichtsiebung. Wie in Kapitel 4.1.2 erläutert, hängt sie von der relativ offenen Siebfläche, dem Verhältnis von Korngröße zu Maschenweite, der Schichthöhe und der Zusammensetzung der Kornfraktionen (Feingut- bzw. Grobgutanteil) ab.

In der Siebkonstante noch nicht berücksichtigt ist die Auflockerung der Gutschicht. Als Maß für die Auflockerung kann die Siebkennziffer K_V herangezogen werden. Die Siebkennziffer charakterisiert die Beschleunigungen, denen das Siebgut ausgesetzt ist (siehe Kapitel 4.1.1). In Abbildung 32 ist der vom angegebenen Autor empirisch ermittelte Zusammenhang zwischen Siebkennziffer und Auflockerungskennziffer dargestellt. Im Hauptklassierbereich zwischen K_V 3 und K_V 6,4 sind Auflockerungskennziffern zwischen 0,4 und 0,8 üblich. Diese Werte gelten für relativ niedrige Schichthöhen (geringe Wurfbehinderungen der Einzelkörner). Bei einer Dickschicht werden die Impulse zunehmend gedämpft in die obersten Schichten übertragen. Bei einer zu großen Schichthöhe findet keine vollständige Auflockerung mehr statt.


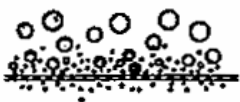
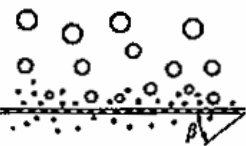
Arbeitsbereich	Unterer Grenzpunkt	Hauptklassierbereich	Oberer Grenzbereich
Zustand der Schüttung			
SiebKennziffer K_V	$K_V = 1$	$3 \leq K_V \leq 6,4$	$K_V > 1$ $6,4 < K_V$
Auflockerungskennziffer ε	$\varepsilon \approx 0,4$	$0,40 \leq \varepsilon \leq 0,80$	$\varepsilon \rightarrow 1$

Abbildung 32: Auflockerungskennziffer in Abhängigkeit der Siebkennziffer⁷⁰

Für das nachfolgende Berechnungsmodell wird die anhand Abbildung 32 in Abhängigkeit von K_V linear ermittelte Auflockerungskennziffer ε noch mit der Schichthöhe verknüpft. Bei einer Dünnschicht (Schichthöhe \sim Maschenweite) bleibt die Auflockerungskennziffer unverändert. Bei einer Dickschicht (Schichthöhe $>$ Maschenweite) wird die Kennziffer mit dem Verhältnis Maschenweite / Schichthöhe multipliziert.

Die Siebkonstante k_L wird um die Auflockerungskennziffer ε erweitert. Es folgt aus Gleichung (24):

$$k_L = -n_L \cdot \ln(1 - W_{ges}) \cdot \varepsilon \quad (27)$$

Somit berücksichtigt die Siebkonstante k_L die wichtigsten Parameter, die einen Einfluss auf den Siebprozess haben.

⁷⁰ Meinel, 1974, S.47

8.2 Vorgehensweise für die Berechnung des Modells

Mittels Gleichung (25) kann man den Feingutanteil bestimmen, der nach einer bestimmten Sieblänge ausgesiebt wurde. Dafür wird die Aufgabemenge in folgende Siebfractionen unterteilt:

Siebfraction [mm]
< 8,0
8,0 – 16,0
16,0 – 22,4
22,4 – 31,5
31,5 – 40,0
40,0 – 50,0
50,0 – 63,0
> 63

Für jede Fraktion wird einzeln die Siebkonstante k_L bestimmt und daraus der Feingutanteil nach einer bestimmten Länge berechnet. Da sich Parameter wie Schichthöhe, Auflockerung und Kornzusammensetzung mit der Sieblänge ändern, wird der Aussiebungsprozess in Abschnitte aufgeteilt (Abbildung 33).

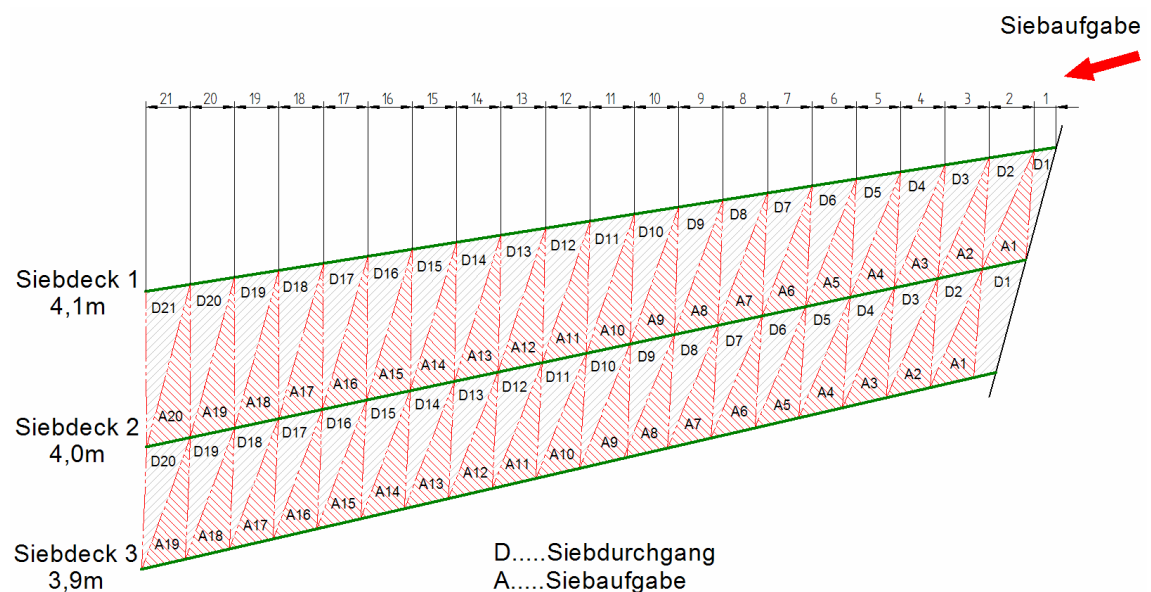


Abbildung 33: Unterteilung der Sieblänge in Abschnitte

Die einzelnen Siebdecks sind um jeweils 0,1m versetzt angeordnet. Demzufolge wäre es zweckmäßig die Abschnitte in 0,1m Schritte aufzuteilen. Um für die Berechnung und Auswertung eine übersichtliche Datenmenge zu bekommen, wird eine Schrittweite von 0,2m gewählt. Siebdeck 1 ist demnach in 21 Abschnitte unterteilt, wobei der 1.Abschnitt 0,1m beträgt. Siebdeck 2 ist in 20 Abschnitte und Siebdeck 3 in 19 Abschnitte unterteilt. Wegen der Schrittweite von 0,2m beginnt der 1.Abschnitt am 3.Deck bei der Sieblänge von 0,1m. Für die Berechnung hat dies keinen entscheidenden Einfluss. Durch die Einteilung ist eine eindeutige Zuordnung der Abschnitte der einzelnen Siebdecks untereinander gewährleistet. Der Siebdurchgang (Feingutanteil) wird schrittweise berechnet. Nach jedem Abschnitt werden die sich mit der Sieblänge ändernden Parameter (Schichthöhe, Auflockerung, Kornzusammensetzung) neu berechnet. Damit wird für jede Fraktion abschnittsweise die Siebkonstante k_L und somit der Feingutanteil ermittelt.

Die Siebaufgabe findet auf dem Siebdeck 1 - Abschnitt 1 statt. Der Siebdurchgang wird abschnittsweise über die gesamte Decklänge berechnet. Die Aufgabemenge für das Siebdeck 2 - Abschnitt 1 ist dann der Siebdurchgang von Siebdeck 1 - Abschnitt 1. Danach wird wieder schrittweise weitergerechnet. Auf Siebdeck 2 - Abschnitt 2 befindet sich dann der Siebdurchgang von Siebdeck 1 - Abschnitt 2 und der Rest von Siebdeck 2 - Abschnitt 1 der nicht abgesiebt wurde. Die gleiche Vorgehensweise findet auch für die restlichen Abschnitte und für Siebdeck 3 statt.

8.3 Ausgangsdaten für die Berechnung

In Tabelle 6 sind die für die Berechnung notwendigen Ausgangsdaten nochmals übersichtlich aufgelistet. Nicht berücksichtigt wurde die effektive Maschenweite (senkrecht projizierende Öffnung - siehe Abbildung 34), da sich durch die geringen Neigungswinkel der einzelnen Siebebenen nur eine minimale Verkleinerung der Maschenweite ergibt, die man vernachlässigen kann.

Tabelle 6: Übersicht Siebdaten

Gesamtmasse Sieb	m_{Sges}	6950 kg
Masse Unwuchtwellen	m_u	822 kg
Masse Siebkasten (ohne Unwuchtwellen)	m_S	6128 kg
Unwuchtradius	r_u	41 mm
Betriebsdrehzahl	n	1200 U/min
Länge Siebdeck 1	L_1	4,1 m
Länge Siebdeck 2	L_2	4,0 m
Länge Siebdeck 3	L_3	3,9 m
Siebbreite je Deck	B	1,9 m
Maschenweite Siebdeck 1	w_1	80 mm
Maschenweite Siebdeck 2	w_2	55 mm
Maschenweite Siebdeck 3	w_3	35 mm
Drahtdicke Siebdeck 1	d_1	12 mm
Drahtdicke Siebdeck 2	d_2	8,4 mm
Drahtdicke Siebdeck 3	d_3	6,7 mm
Neigungswinkel Siebdeck 1	β_1	9 °
Neigungswinkel Siebdeck 2	β_2	12 °
Neigungswinkel Siebdeck 3	β_3	13 °
Wurfwinkel	α	45 °

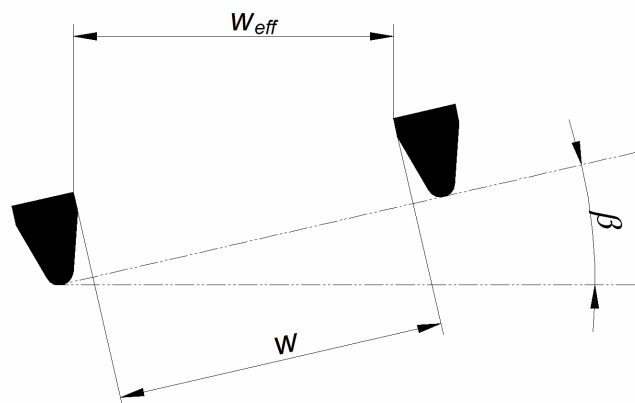


Abbildung 34: Effektive Maschenweite

8.4 Ermittlung der Materialmenge am Sieb

Da es sich bei dem Linearschwingsieb mit Doppelwuchtantrieb um ein freischwingendes, kraftbegrenztes System handelt, ist die Materialmenge, welche sich am Sieb befindet, entscheidend für die Berechnung. Für die Ermittlung der Amplitude e muss die Siebkastenmasse m_S mit der Masse m_{Mat} des auf dem Sieb befindlichen Materials addiert werden. Die Momentengleichung für das freischwingende System lautet:

$$(m_S + m_{Mat}) \cdot e = m_u \cdot (r_u - e) \quad (28)$$

Durch Umformen ergibt sich für die Amplitude:

$$e = \frac{m_u \cdot r_u}{m_S + m_{Mat} + m_u} \quad (29)$$

Die Materialmenge am Sieb hängt in erster Linie von der Aufgabemenge, und der Transportgeschwindigkeit des Siebguts ab. Für die Ermittlung der Transportgeschwindigkeit wird aber unter anderem die Amplitude benötigt, für deren Berechnung die Menge am Sieb bekannt sein muss. Darum wird für die Berechnung die Materialmenge definiert und aus dieser die Transportgeschwindigkeit und die Aufgabemenge berechnet.

Für die Belastung des Siebes wird die Materialmenge am Siebüberlauf herangezogen. Diese Menge muss von der Siebaufgabe bis zum Ende der Siebböden befördert werden und ist somit eine ständige Belastung für das Schwingsieb. Geht man davon aus, dass die 30% Feingutanteil ($< 22,4\text{mm}$) in der Aufgabemenge ausgesiebt werden, dann sind 70% der Aufgabemenge im Siebüberlauf (Abbildung 35). Natürlich ist das nur der Fall, wenn das Sieb nicht im überlasteten Bereich arbeitet. Dann würde nämlich der prozentuelle Anteil im Siebüberlauf steigen. In der Praxis ist es nicht üblich in diesem Bereich zu arbeiten, denn Ziel ist es, den Abraumanteil im gereinigten Schotter so gering wie möglich zu halten. Somit wird die Materialmenge am Sieb aus dem Aufgabemengenanteil $> 22,4\text{mm}$ berechnet.

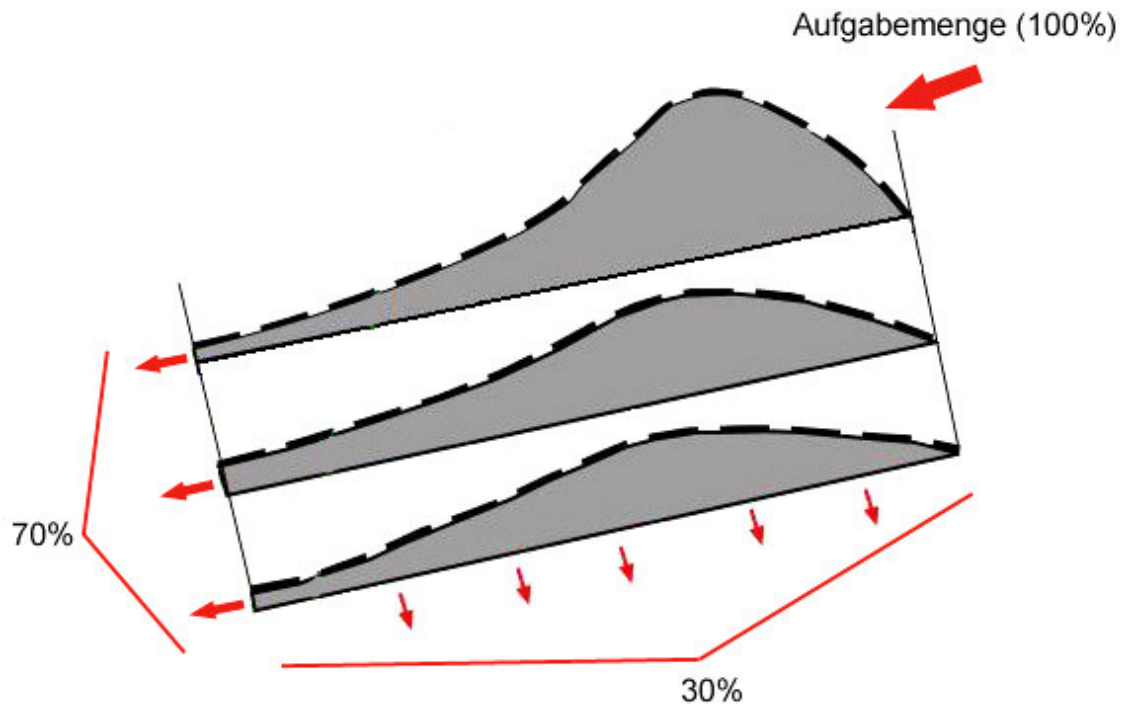


Abbildung 35: Aufgabemengenverteilung am Sieb

Die Feinanteile werden in diesem Anwendungsfall für die Belastung des Siebes vernachlässigt. In der Praxis zeigt sich, dass bei trockenen Arbeitsbedingungen der größte Teil der Feinanteile relativ rasch ausgesiebt wird und somit nur kurzzeitig eine Belastung für das Schwingsieb darstellt.

Der Zusammenhang zwischen Aufgabeeleistung Q_A und der Materialmasse m_{Mat} am Sieb wird für die Berechnung wie folgt definiert:

$$m_{Mat} = H \cdot B \cdot L \cdot \varphi_{Sch} \quad (30)$$

Die Schüttdichte φ_{Sch} des Schotters beträgt dabei 1500 kg/m^3 ⁷¹. Die Materialschichthöhe H wird berechnet aus der Aufgabeeleistung.

$$H = \frac{Q_A}{v_T \cdot 3600 \cdot B} \quad (31)$$

Durch Umformen der Gleichung (30) auf H und Einsetzen in Gleichung (31) folgt für die Materialmasse am Sieb unter Berücksichtigung des Anteils von 70% der Aufgabeeleistung:

⁷¹ vgl. Lichtberger, 2010, S.540

$$m_{mat} = \frac{Q_A \cdot 0,7 \cdot \varphi_{Sch} \cdot L}{v_T \cdot 3600} \quad (32)$$

Daraus lässt sich bei einer vorgegebenen Materialmasse am Sieb die Aufgabeleistung berechnen.

$$Q_A = \frac{m_{mat} \cdot v_T \cdot 3600}{0,7 \cdot \varphi_{Sch} \cdot L} \quad (33)$$

Die Formel für die theoretische Transportgeschwindigkeit v_T lautet⁷²:

$$v_T = \frac{\sqrt{g}}{4 \cdot \pi \cdot m} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \cdot \sqrt{e \cdot K} \cdot \sin \varphi_L \cdot (\varphi_0 - \varphi_L)^2 \quad (34)$$

m ... Anzahl der angefangenen Schwingungen während der Flugzeit der Schotterkörner. Flugzeit = $\frac{1}{\omega} \cdot (\varphi_0 - \varphi_L)$

Der Auftreffwinkel φ_0 wird aus Abbildung 36 in Abhängigkeit des Ablöswinkels φ_L ermittelt.

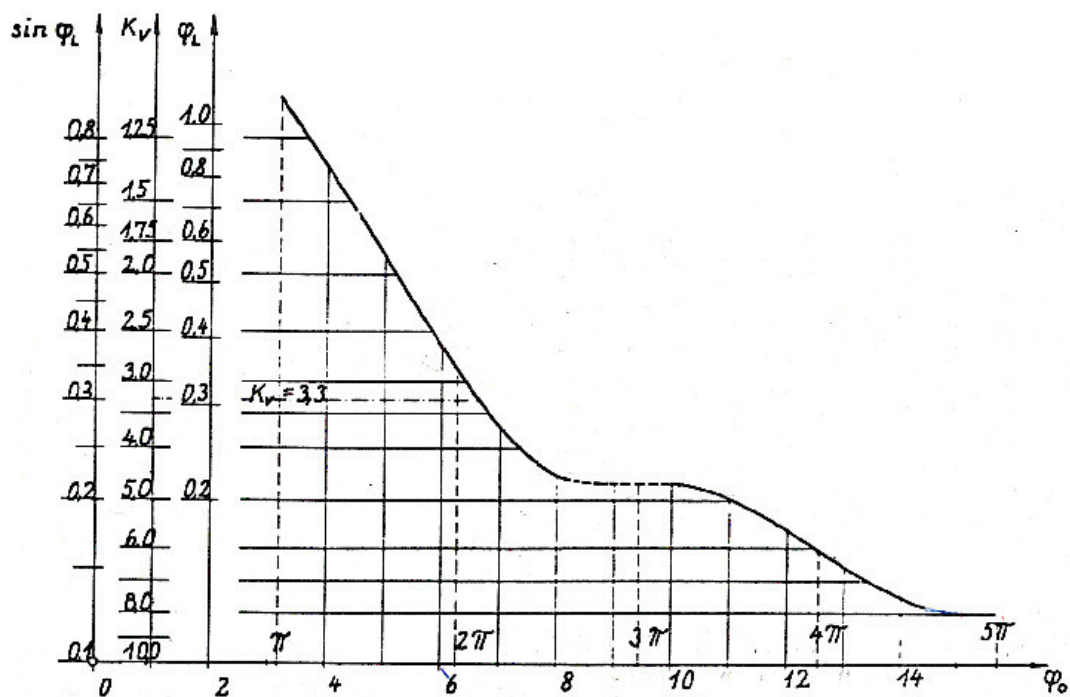


Abbildung 36: Auftreffwinkel in Abhängigkeit vom Ablöswinkel⁷³

⁷² Klockhaus, 1952, S.494

⁷³ Salzer, 1964, S.112

Als Beispiel wird für eine definierte Materialmasse am Sieb von 1000 kg die Berechnung der Aufgabelleistung durchgeführt.

Die Amplitude berechnet sich aus Gleichung (29):

$$e = \frac{m_u \cdot r_u}{m_s + m_{sch} + m_u} = \frac{822 \cdot 0,041}{6128 + 1000 + 822} = 0,00424m = 4,24mm$$

Aus Gleichung (1) folgt die Maschinenkennziffer

$$K = \frac{e \cdot \omega^2}{g} = \frac{0,00424 \cdot (\pi \cdot 1200)^2}{9,81 \cdot 30^2} = 6,83$$

Mittels Gleichung (5) ermittelt man die Siebkennziffer der einzelnen Siebdecks:

$$K_v = K \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}$$

$$K_{v,1} = 6,83 \cdot \frac{\sin(45 + 9)}{\cos 9} = 5,59$$

$$K_{v,2} = 6,83 \cdot \frac{\sin(45 + 12)}{\cos 12} = 5,86$$

$$K_{v,3} = 6,83 \cdot \frac{\sin(45 + 13)}{\cos 13} = 5,94$$

Der Ablösewinkel berechnet sich aus Gleichung (6):

$$\varphi_L = \arcsin\left(\frac{1}{K_v}\right)$$

$$\varphi_{L,1} = \arcsin\left(\frac{1}{5,59}\right) = 0,180$$

$$\varphi_{L,2} = \arcsin\left(\frac{1}{5,86}\right) = 0,171$$

$$\varphi_{L,3} = \arcsin\left(\frac{1}{5,94}\right) = 0,169$$

Aus Abbildung 36 kann man die Auftreffwinkel entnehmen:

$$\varphi_{0,1} = 12,0$$

$$\varphi_{0,2} = 12,3$$

$$\varphi_{0,3} = 12,4$$

Die Transportgeschwindigkeiten der einzelnen Siebdecks werden mit Gleichung (34) berechnet:

$$v_T = \frac{\sqrt{g}}{4 \cdot \pi \cdot m} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \cdot \sqrt{e \cdot K} \cdot \sin \varphi_L \cdot (\varphi_0 - \varphi_L)^2$$

$$v_{T,1} = \frac{\sqrt{9,81}}{4 \cdot \pi \cdot 2} \cdot \frac{\cos 45}{\cos 9} \cdot \sqrt{0,00424 \cdot 6,83} \cdot \sin(0,180) \cdot (12,0 - 0,180)^2 = 0,379 \text{ m/s}$$

$$v_{T,2} = \frac{\sqrt{9,81}}{4 \cdot \pi \cdot 2} \cdot \frac{\cos 45}{\cos 12} \cdot \sqrt{0,00424 \cdot 6,83} \cdot \sin(0,172) \cdot (12,3 - 0,171)^2 = 0,385 \text{ m/s}$$

$$v_{T,3} = \frac{\sqrt{9,81}}{4 \cdot \pi \cdot 2} \cdot \frac{\cos 45}{\cos 13} \cdot \sqrt{0,00424 \cdot 6,83} \cdot \sin(0,169) \cdot (12,4 - 0,169)^2 = 0,388 \text{ m/s}$$

Für die Berechnung der Aufgabelleistung wird die Durchschnittsgeschwindigkeit von Siebdeck 2 und 3 genommen, da hier das meiste Siebgut in den Siebüberlauf gelangt. Am 1.Deck wird bei normaler Reinigungsleistung nur das anteilmäßig geringe Überkorn bis zum Siebbodenende befördert.

Die Aufgabelleistung ergibt sich aus Gleichung (33):

$$Q_A = \frac{m_{\text{mat}} \cdot v_{T,2,3} \cdot 3600}{0,7 \cdot \varphi_{\text{Sch}} \cdot L} = \frac{1000 \cdot 0,387 \cdot 3600}{0,7 \cdot 1500 \cdot 4,3} = 309 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Bei 309m³/h Aufgabelleistung beträgt die Materialmenge am Sieb 1000kg. Die Berechnung für Materialmengen am Sieb von 600kg bis 2500kg wurde jeweils in 100 kg Abständen durchgeführt. Dabei wurde die jeweilige Aufgabelleistung ermittelt (Anhang II).

8.5 Berechnung der einzelnen Siebdecks

Im Nachfolgenden werden noch notwendige Daten für die Berechnung des Siebmodells ermittelt und Randbedingungen festgelegt.

Bei den Sieb-Untersuchungen mit der Reinigungsmaschine RM80-VRCh1 wurde mit folgenden Maschineneinstellungen gereinigt:

- Aushubbreite 4,03m
- Aushubtiefe 0,46m unter Oberkante Schwelle
- Arbeitsvorschub > 300m/h

Somit beträgt die Aufgabeeleistung für die Berechnung des Siebmodells:

$$Q_A = 4,03 \cdot 0,46 \cdot 300 = 556 \text{ m}^3 / \text{h} \approx 560 \text{ m}^3 / \text{h} = 840 \text{ t} / \text{h} = 233 \text{ kg} / \text{s}$$

Für die Siebaufgabe werden die aus den Untersuchungsergebnissen (Tabelle 5) ermittelten prozentuellen Massenanteile der einzelnen Siebfractionen des ungereinigten Schotters übernommen.

Tabelle 7: Kornzusammensetzung der Siebaufgabe

Siebfraction [mm]	Massenanteile	
	[kg]	[%]
< 8,0	47,49	20,38
8,0-16,0	11,98	5,14
16,0-22,4	10,44	4,48
22,4-31,5	17,94	7,70
31,5-40,0	49,58	21,28
40,0-50,0	45,06	19,34
50,0-63,0	36,44	15,64
> 63	14,07	6,04
Σ	233,00	100,00

In der Siebaufgabe befinden sich 64 Prozent brauchbarer Schotterkörnung (grün markiert).

Die Aufgabeeleistung von 560m³/h entspricht einer Materialmenge am Sieb von ca. 2200 kg (siehe Anhang II). Es wurden folgende Siebdaten für die Berechnung der Aufgabeeleistung ermittelt:

Amplitude	e	3,68mm
Maschinenkennziffer	K	5,92
Siebkennziffer	$K_{V,1}$ (1.Deck)	4,85
	$K_{V,2}$ (2.Deck)	5,08
	$K_{V,3}$ (3.Deck)	5,15
Abwurfwinkel	$\varphi_{L,1}$ (1.Deck)	0,208
	$\varphi_{L,2}$ (2.Deck)	0,198
	$\varphi_{L,3}$ (3.Deck)	0,195
Auftreffwinkel	$\varphi_{0,1}$ (1.Deck)	10,7
	$\varphi_{0,2}$ (2.Deck)	11,2
	$\varphi_{0,3}$ (3.Deck)	11,3
Fördergeschwindigkeit	$v_{T,1}$ (1.Deck)	0,299m/s
	$v_{T,2}$ (2.Deck)	0,317m/s
	$v_{T,3}$ (3.Deck)	0,320m/s

Anhand der Fördergeschwindigkeit, der Schwingfrequenz und der Flugzeit der Schotterkörner pro Wurf kann die Anzahl der Auftreffereignisse ermittelt werden. Bei der Antriebsdrehzahl von 1200 U/min beträgt die Schwingfrequenz 20 Hz und die Periodendauer T einer ganzen Schwingung 0,05s. Die Flugzeit der Schotterkörner berechnet sich folgendermaßen⁷⁴:

$$t_F = \frac{1}{\omega}(\varphi_0 - \varphi_L) \quad (35)$$

⁷⁴ Klockhaus, 1952, S.493

Die Flugzeit der Schotterkörner für die einzelnen Siebdecks beträgt:

$$t_{F,1} = \frac{30}{\pi \cdot 1200} \cdot (10,7 - 0,208) = 0,083s$$

$$t_{F,2} = \frac{30}{\pi \cdot 1200} \cdot (11,2 - 0,198) = 0,088s$$

$$t_{F,3} = \frac{30}{\pi \cdot 1200} \cdot (11,3 - 0,195) = 0,088s$$

Aus den berechneten Werten ist ersichtlich, dass die Flugzeit knapp 2 ganze Schwingungsperioden in Anspruch nimmt. Daraus lässt sich ableiten, dass im Schnitt bei jeder 2. Schwingung ein Auftreffereignis stattfindet. Aus dem Vorstehenden wird für die Siebdecks die Anzahl der Auftreffereignisse pro Meter ermittelt. Die Ergebnisse sind auf die nächste ganze Zahl abgerundet.

$$n_L = \frac{1}{v_T \cdot 2 \cdot T}$$

$$n_{L,1} = \frac{1}{0,299 \cdot 2 \cdot 0,05} = 33/m$$

$$n_{L,2} = \frac{1}{0,317 \cdot 2 \cdot 0,05} = 31/m$$

$$n_{L,3} = \frac{1}{0,320 \cdot 2 \cdot 0,05} = 31/m$$

Mit Hilfe von Abbildung 32 wird die Auflockerungskennziffer linear in Abhängigkeit der Siebkennziffer ermittelt.

$$K_{V,1} = 4,85 \quad \rightarrow \quad \varepsilon_1 = 0,62$$

$$K_{V,2} = 5,08 \quad \rightarrow \quad \varepsilon_2 = 0,64$$

$$K_{V,3} = 5,15 \quad \rightarrow \quad \varepsilon_3 = 0,65$$

Je nach Schichthöhe auf den Siebdecks wird die Auflockerungskennziffer noch mit dem Verhältnis Maschenweite/Schichthöhe multipliziert.

Bezüglich der Feingut- und Grobgutvolumenanteile wird für die Berechnung der Durchgangswahrscheinlichkeit folgende Einteilung getroffen:

Da nicht nur das Grobgut ($x > w$), sondern auch das siebschwierige Grenzkorn ($x \sim \text{ab } 0,8 w$), das Feingut beim Durchgang behindert, wird der Anteil kleiner $0,8 w$ als Feingutvolumenanteil festgelegt.

Das bedeutet für die einzelnen Siebdecks:

Siebdeck 1 $w=80\text{mm} \rightarrow 80 \cdot 0,8 = 64\text{mm}$

Siebdeck 2 $w=55\text{mm} \rightarrow 55 \cdot 0,8 = 44\text{mm}$

Siebdeck 3 $w=35\text{mm} \rightarrow 35 \cdot 0,8 = 28\text{mm}$

Da die Korngrößen in Fraktionen eingeteilt sind, werden beim 1.Deck die Fraktionen $<63\text{mm}$, beim 2.Deck $<40\text{mm}$ und beim 3.Deck $<31,5\text{mm}$ als Feingutvolumen festgelegt.

In den nachfolgenden Berechnungen werden die Variablen mit 2 Indizes belegt. Der 1.Index weist auf die Siebdecknummer hin, und der 2.Index gibt den Abschnitt an.

8.5.1 Berechnung Siebdeck 1

Die Schichthöhe bei der Siebaufgabe beträgt:

$$H_{1,1} = \frac{Q_A}{v_{T,1} \cdot 3600 \cdot B} = \frac{560}{0,299 \cdot 3600 \cdot 1,9} = 0,274\text{m}$$

Da die Schichthöhe größer als die Maschenweite ist, wird die Auflockerungskennziffer mit dem Verhältnis Maschenweite/Schichthöhe multipliziert.

$$\varepsilon_{1,1} = \varepsilon_1 \cdot \frac{w_1}{H_{1,1}} = 0,61 \cdot \frac{0,08}{0,274} = 0,18$$

Die Volumenanteile $V_{<63,1,1}$ und $V_{>63,1,1}$ für den 1. Abschnitt werden nach Tabelle 7 ermittelt und betragen:

$$V_{<63,1,1} = 0,94$$

$$V_{>63,1,1} = 0,06$$

Mittels Gleichung (9) kann jetzt die Gesamtdurchgangswahrscheinlichkeit W_{ges} und danach mit Gleichung (27) die Siebkonstante k_L der einzelnen Korngrößen x ermittelt werden. Für die Kornfraktion wird dann der Mittelwert aus den

einzelnen k_L -Werten gebildet. Als Beispiel sind in Tabelle 8 die berechneten Werte für die Siebfraction <8mm für den 1.Abschnitt dargestellt.

Tabelle 8: Ermittlung der Siebkonstante k_L für die Siebfraction <8mm

Siebfraction [mm]	x [mm]	$W_{ges,1,1}$	$k_{L,1,1}$ [1/m]	Mittelwert $k_{L,1,1}$ [1/m]
< 8	1	0,202	1,340	1,216
	2	0,197	1,303	
	3	0,192	1,266	
	4	0,187	1,230	
	5	0,183	1,201	
	6	0,178	1,164	
	7	0,173	1,128	
	8	0,168	1,093	

Nach dem gleichen Schema werden für die restlichen Siebfractionen die Mittelwerte der Siebkonstanten berechnet. Mit der Siebkonstante $k_{L,1,1}$ kann nun für Abschnitt 1 der Siebdurchgang der Fraktion <8mm berechnet werden. Die Länge von Abschnitt 1 am 1.Deck beträgt 0,1m. Alle weiteren Abschnitte sind 0,2m lang (siehe Kapitel 8.2).

$$\dot{m}_{F,D} = \dot{m}_{F,A} \cdot [1 - \exp(-k_{L,1,1} \cdot L_{1,1})] = 47,49 \cdot [1 - \exp(-1,216 \cdot 0,1)] = 5,44 \text{ kg / s}$$

Nachdem für alle Fraktionen der Feingutanteil im Abschnitt 1 berechnet wurde, werden für Abschnitt 2 aus dem Siebrückstand die aktuelle Schichthöhe, die Volumenanteile und die Auflockerungskennziffer berechnet. Danach werden wiederum die Mittelwerte der Siebkonstanten für die Berechnung des Feingutanteils für Abschnitt 2 ermittelt. Diese Vorgehensweise wird bis zum letzten Abschnitt des 1.Siebdecks durchgeführt. Im Anhang III sind für das gesamte Siebdeck 1 die berechneten Werte für die einzelnen Abschnitte aufgelistet. Abbildung 37 zeigt den Siebdurchgang des Feinguts über die gesamte Sieblänge des 1.Decks.

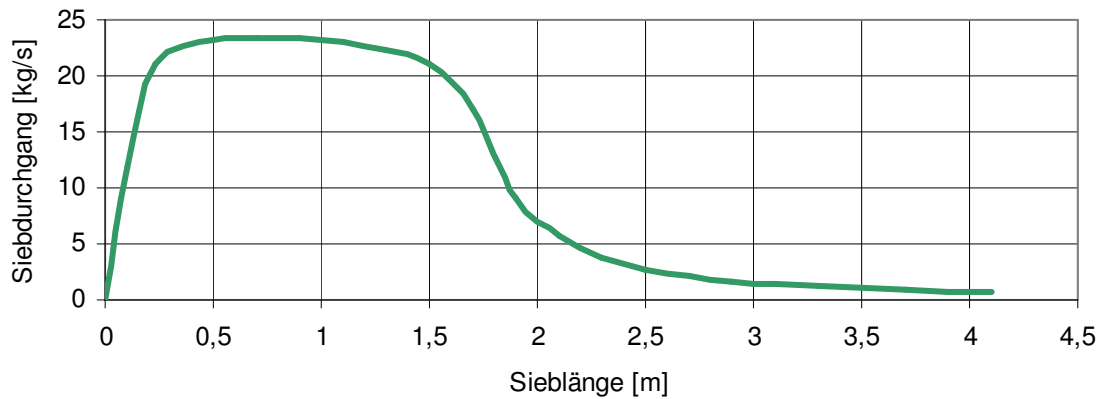


Abbildung 37: Siebdeck 1 - Verlauf des Siebdurchgangs

Aus Abbildung 37 ist ersichtlich, dass bis 1,5m Sieblänge der größte Feingutanteil stattfindet. Im hinteren Bereich wird das siebschwierige Grenzkorn ausgesiebt. In der Praxis wird häufig im Aufgabebereich des 1.Siebdecks eine kleinere Maschenweite gewählt, damit nicht gleich der Hauptteil des Siebdurchgangs auf das 2.Deck durchfällt. Abbildung 38 zeigt den Verlauf der Schichthöhe entlang der Sieblänge.

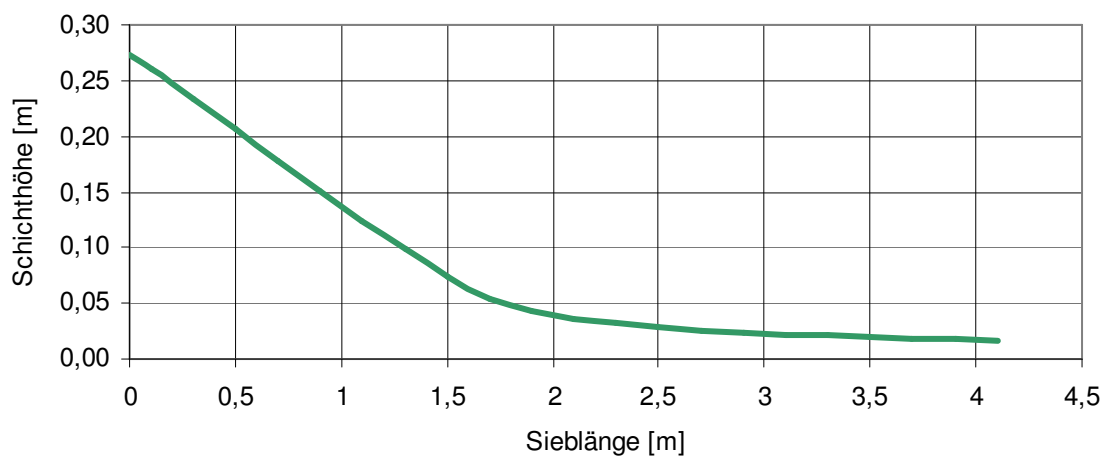


Abbildung 38: Siebdeck 1 - Verlauf der Schichthöhe

Durch den großen Siebdurchgang im ersten Drittel des Siebdecks, nimmt die Schichthöhe relativ rasch ab.

8.5.2 Berechnung Siebdeck 2

Der Ablauf der Berechnung für das 2.Deck ist prinzipiell ident mit der Berechnung von Siebdeck 1. Als Aufgabemenge für den 1. Abschnitt dient der Siebdurchgang vom 1.Abschnitt des 1.Decks. Die Schichthöhe am Beginn des 2.Decks beträgt:

$$H_{2,1} = \frac{\dot{m}_A}{\varphi_{Sch} \cdot v_{T,2} \cdot B} = \frac{11,68}{1500 \cdot 0,317 \cdot 1,9} = 0,013m$$

Da die Schichthöhe kleiner als die Maschenweite ist, bleibt die für das 2.Deck ermittelte Auflockerungskennziffer zu Beginn unverändert.

$$\varepsilon_{2,1} = \varepsilon_2 = 0,64$$

Die Volumenanteile $V_{<40,2,1}$ und $V_{>40,2,1}$ für den 1.Abschnitt werden nach dem Feingutanteil von Deck 1 - Abschnitt 1 ermittelt und betragen:

$$V_{<40,2,1} = 0,873$$

$$V_{>40,2,1} = 0,127$$

Nach der Berechnung des Siebdurchgangs für den 1.Abschnitt ermittelt sich die Aufgabemenge für den 2.Abschnitt aus dem Rückstand des 1.Abschnitts und dem Siebdurchgang des 2.Abschnitts des 1. Decks. Das gleiche Schema wird für die weiteren Abschnitte angewandt. Die berechneten Werte für das gesamte Siebdeck 2 sind im Anhang IV aufgelistet. Abbildung 39 zeigt den Siebdurchgang des Feinguts über die gesamte Sieblänge des 2.Siebdecks.

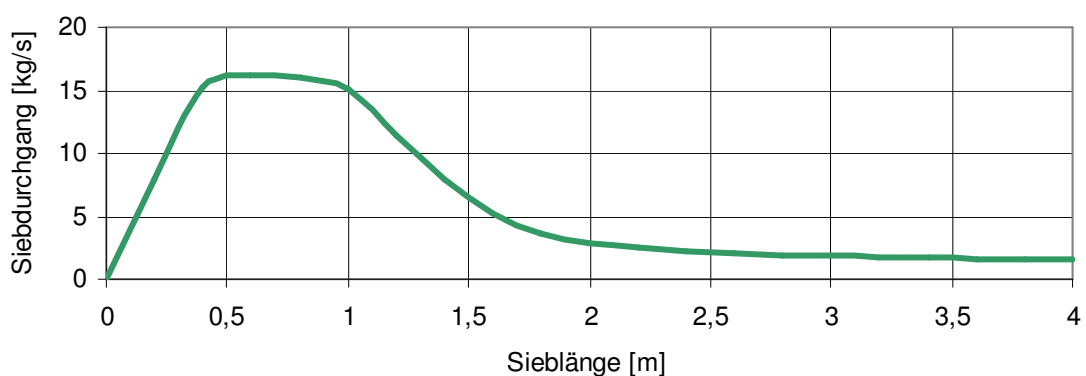


Abbildung 39: Siebdeck 2 - Verlauf des Siebdurchgangs

Der größte Feingutanfall ist im Bereich zwischen 0,5m und 1m Sieblänge. Der Verlauf der Schichthöhe ist in Abbildung 40 dargestellt.

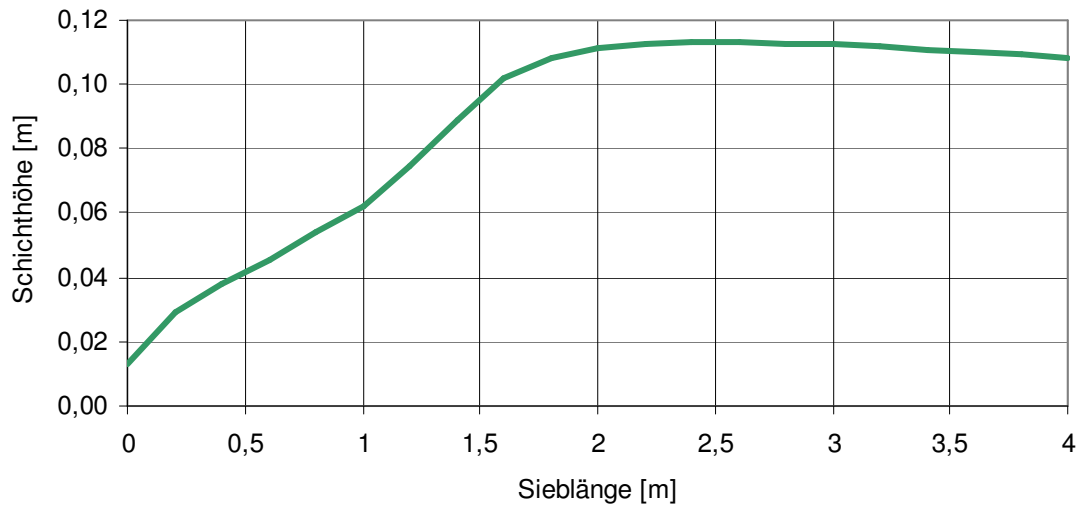


Abbildung 40: Siebdeck 2 - Verlauf der Schichthöhe

Aus den Abbildungen 39 und 40 ist ersichtlich, dass mit dem Rückgang des Siebdurchgangs gleichzeitig die Schichthöhe stark ansteigt. Noch ein Grund für den steilen Anstieg ist der große Siebdurchgang vom 1.Deck im Anfangsbereich. Ab 2m Sieblänge bleibt die Schichthöhe bis zum Siebüberlauf annähernd konstant.

8.5.3 Berechnung Siebdeck 3

Die Berechnung von Siebdeck 3 erfolgt gemäß Siebdeck 2. Die berechneten Werte für das 3.Deck sind im Anhang V zu finden. Abbildung 40 zeigt den Siebdurchgang des Feinguts über die gesamte Sieblänge des 3.Siebdecks.

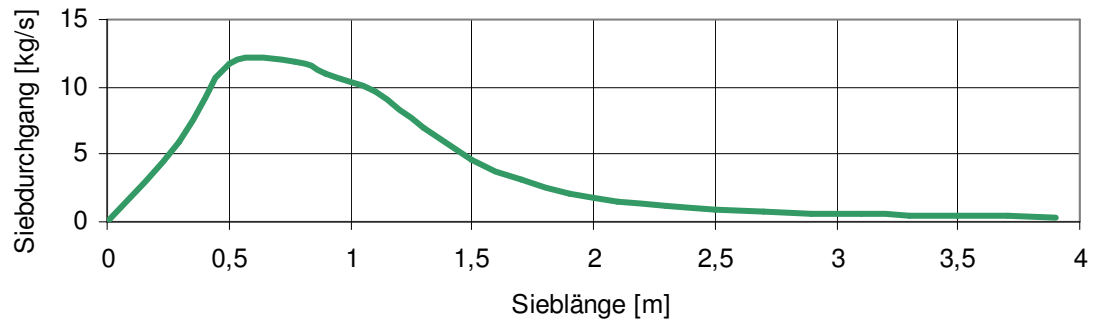


Abbildung 41: Siebdeck 3 - Verlauf des Siebdurchgangs

Der Verlauf des Siebdurchgangs am 3.Deck ist ähnlich dem am 2.Deck. Der größte Feingutanfall ist zwischen 0,5m und 1m Sieblänge. Der Kurvenverlauf der Schichthöhe (Abbildung 42) zeigt einen ständigen Anstieg vom Siebanfang bis zum Siebende. Am Siebüberlauf beträgt die Schichthöhe ca. das Eineinhalbfache der Maschenweite.

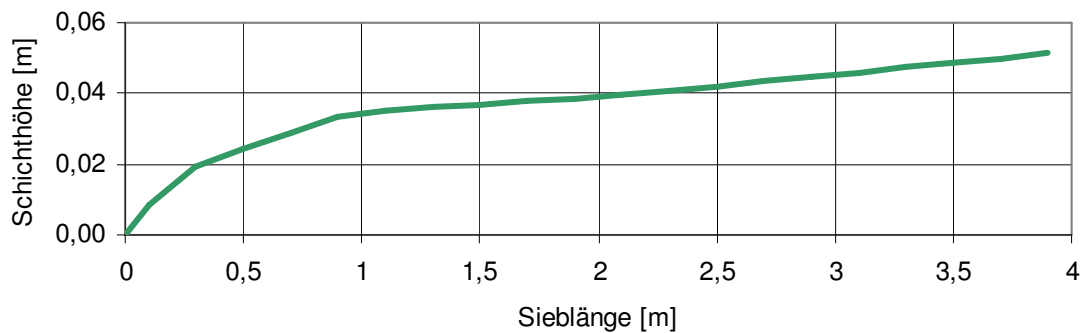


Abbildung 42: Siebdeck 3 - Verlauf der Schichthöhe

9 Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse

9.1 Ergebnisse des Berechnungsmodells

Abbildung 43 zeigt die anhand der Berechnung ermittelten Massenströme auf dem Schwingsieb.

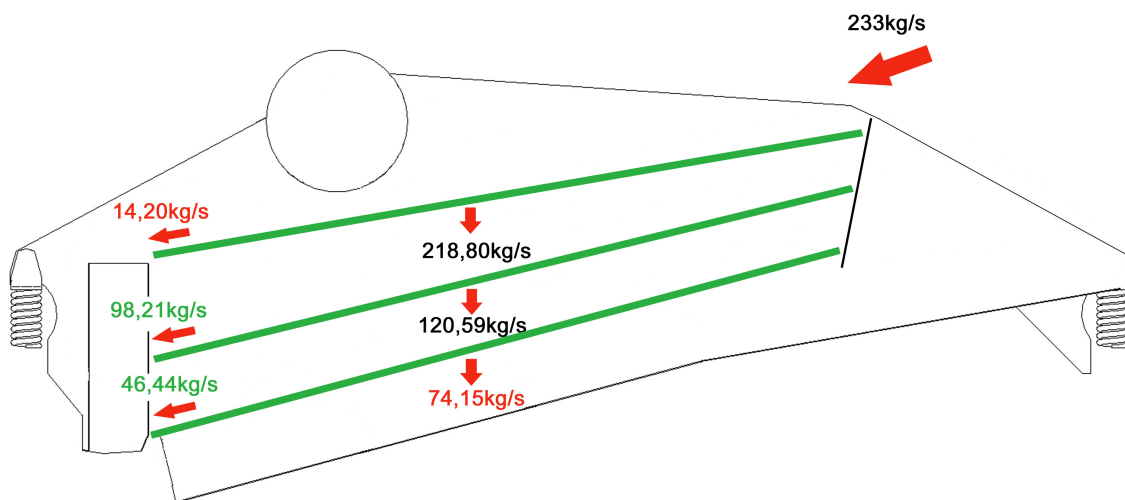


Abbildung 43: Massenströme am Berechnungsmodell

Der Rückgewinn an Schotter beträgt 62%, demnach sind 38% von der Aufgabemenge dem Abraum zuzuordnen. Vom 1.Siebdeck werden ca. 6% über den Überkornschaft ausgeschieden. Am 2.Siebdeck wird der größte Anteil des Schotters gewonnen. Mit 31,8% entspricht der ausgesiebte Abraumanteil am 3.Deck etwa der Annahme von 30%, welche für die Berechnung der Materialmenge am Sieb (Kapitel 8.4) definiert wurde.

In Tabelle 9 sind die anhand des Siebmodells berechneten Massenanteile der einzelnen Fraktionen des gereinigten Schotters und des Bettungsrückstands aufgelistet.

Tabelle 9: Kornzusammensetzung des gereinigten Schotters und des Bettungsrückstands (Berechnung)

	Gereinigter Schotter		Bettungsrückstand	
Siebfraktion	Massenanteile		Massenanteile	
[mm]	[kg]	[%]	[kg]	[%]
< 8,0	0,27	0,19	47,22	53,45
8,0-16,0	0,46	0,32	11,52	13,04
16,0-22,4	1,91	1,32	8,53	9,65
22,4-31,5	11,37	7,86	6,57	7,44
31,5-40,0	49,26	34,05	0,32	0,36
40,0-50,0	44,75	30,94	0,31	0,35
50,0-63,0	32,56	22,51	3,88	4,39
> 63	4,07	2,81	10,00	11,32
Σ	144,65	100,00	88,35	100,00

Der Feingutanteil < 22,4mm im gereinigten Schotter beträgt unter 2 Masseprozent. Man kann von einer sehr guten Reinigungsqualität sprechen. Der Anteil an brauchbarer Schotterkörnung 22,4 – 63mm im Bettungsrückstand (rot markiert) ist mit 12,5 Prozent relativ gering. Grün markiert ist der Anteil der brauchbaren Schotterkörnung im gereinigten Schotter. Er beträgt 95,4 Prozent. Von der brauchbaren Schotterkörnung in der Aufgabemenge (Tabelle 7) wurden knapp 93 Prozent des Schotters rückgewonnen. In der Praxis ist eine Siebwirkung um die 90 Prozent als normal einzustufen.

Der Sieblinienverlauf des gereinigten Schotters ist in Abbildung 44 dargestellt.

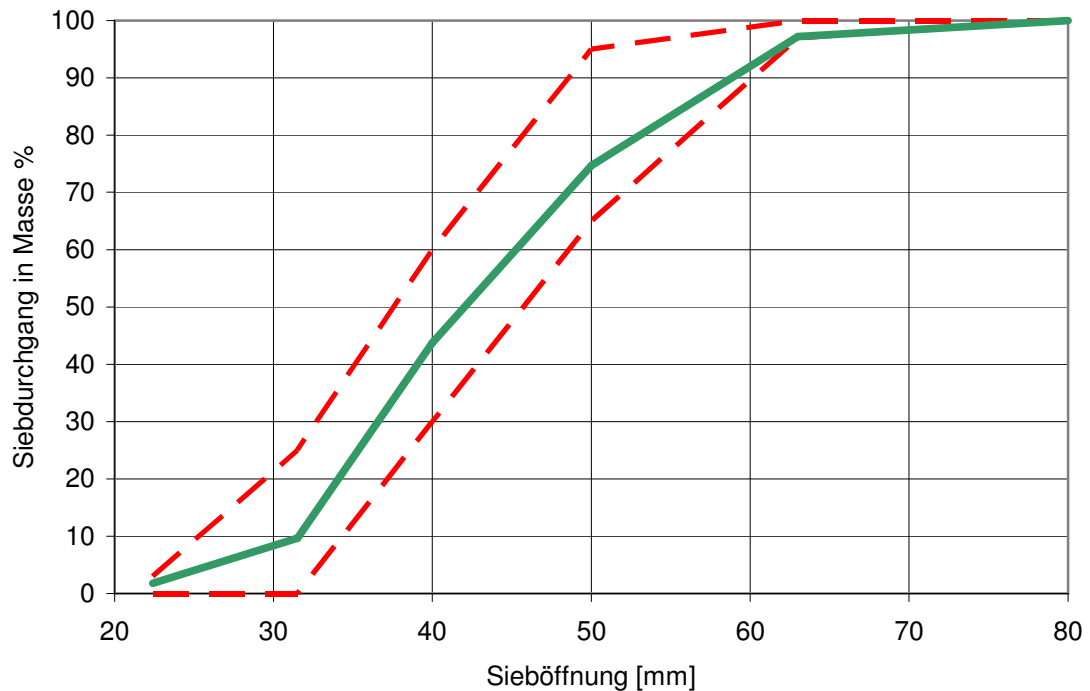


Abbildung 44: Siebkurve des gereinigten Schotters

Die Sieblinie des gereinigten Schotters zeigt einen typischen Kennlinienverlauf. Der zulässige Sieblinienbereich ist rot strichliert dargestellt. In der Praxis sind die Maschenweiten der Siebe in der Regel so eingestellt, dass die Siebkurve des gereinigten Schotters im unteren Drittel des zulässigen Bereichs liegt. Durch kleinere Maschenweiten auf den einzelnen Siebdecks würde die Kurve in den oberen Grenzbereich wandern. Dies würde einen höheren Schotterrückgewinn bedeuten, allerdings bei einer geringeren Arbeitsleistung der Maschine.

9.2 Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit dem Berechnungsmodell

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse des gereinigten Schotters von der Berechnung und der Messung im Vergleich dargestellt. In Tabelle 11 erfolgt der Vergleich mit dem Bettungsrückstand. Die Analyse der Abweichungen ist im nächsten Kapitel dargestellt.

Tabelle 10: Gereinigter Schotter (Messung - Berechnung)

	Messung		Berechnung	
Siebfraktion	Massenanteile		Massenanteile	
[mm]	[kg]	[%]	[kg]	[%]
< 8,0	1,28	0,89	0,27	0,19
8,0-16,0	1,28	0,89	0,46	0,32
16,0-22,4	1,02	0,71	1,91	1,32
22,4-31,5	8,37	5,84	11,37	7,86
31,5-40,0	42,67	29,76	49,26	34,05
40,0-50,0	41,83	29,17	44,75	30,94
50,0-63,0	33,81	23,58	32,56	22,51
> 63	13,13	9,16	4,07	2,81
Σ	143,39	100,00	144,65	100,00

Tabelle 11: Bettungsrückstand (Messung - Berechnung)

	Messung		Berechnung	
Siebfraktion	Massenanteile		Massenanteile	
[mm]	[kg]	[%]	[kg]	[%]
< 8,0	46,22	51,58	47,22	53,45
8,0-16,0	10,70	11,94	11,52	13,04
16,0-22,4	9,41	10,50	8,53	9,65
22,4-31,5	9,57	10,68	6,57	7,44
31,5-40,0	6,90	7,70	0,32	0,36
40,0-50,0	3,23	3,60	0,31	0,35
50,0-63,0	2,63	2,94	3,88	4,39
> 63	0,95	1,06	10,00	11,32
Σ	89,61	100,00	88,35	100

9.3 Analyse der Abweichungen

Wie man auf dem ersten Blick aus Tabelle 10 und 11 erkennen kann, ist die Gesamtmasse des gereinigten Schotters und des Bettungsrückstands zwischen Messung und Berechnung annähernd identisch. Abweichungen bei den Massenanteilen ergeben sich in den einzelnen Siebfraktionen. Zum besseren Vergleich sind in den Abbildungen 45 und 46 die Summenkurven der Massenanteile vom gereinigten Schotter und vom Bettungsrückstand dargestellt.

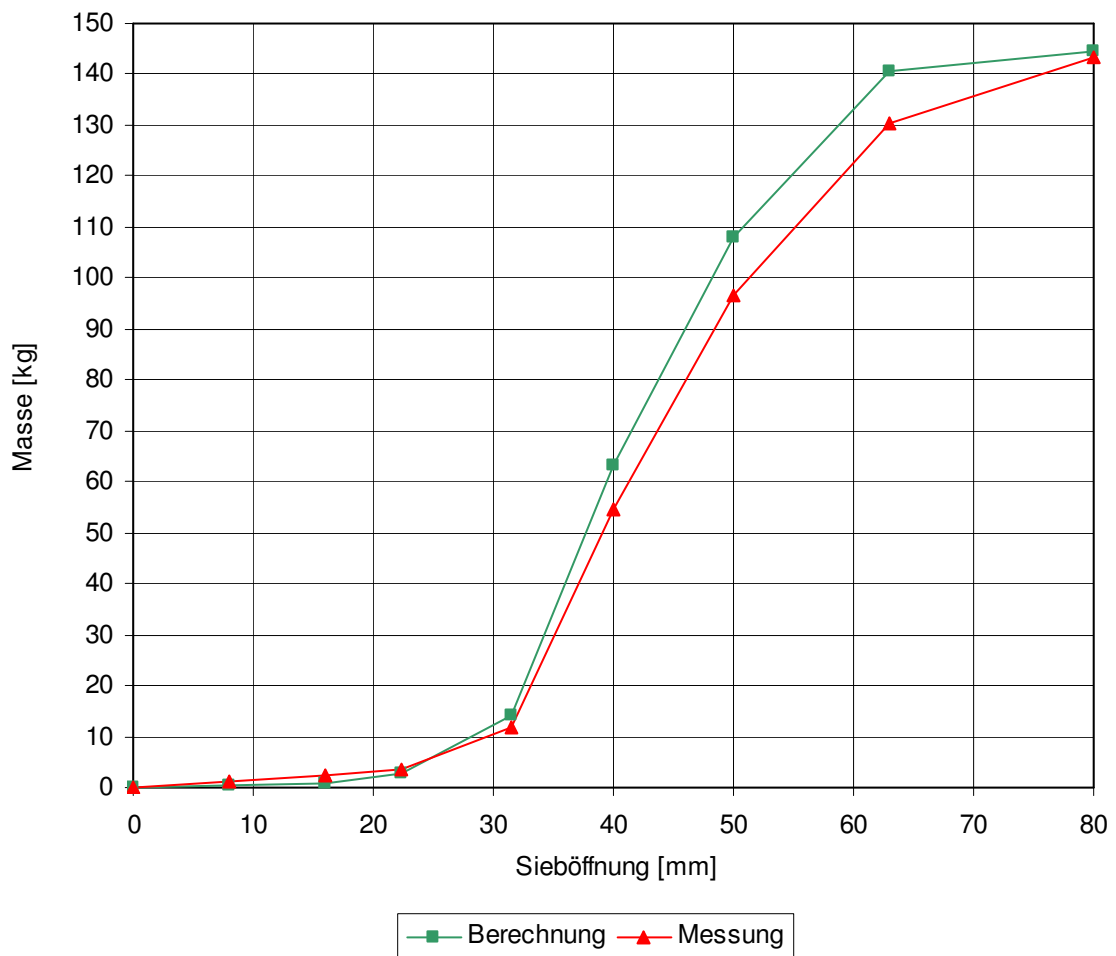


Abbildung 45: Summenkurve der Massenanteile - gereinigter Schotter

Größere Abweichungen ergeben sich bei den Kornfraktionen zwischen 22,4 und 40mm. In diesem Bereich werden im Berechnungsmodell mehr Massenanteile rückgewonnen, als bei den Siebuntersuchungen gemessen wurde. Der Kurvenverlauf der Berechnung steigt, im Vergleich zum Kurvenverlauf der Messung, hier steiler an. Zwischen den Fraktionen 40 und 63mm sind die Kurven-

verläufe annähernd parallel. Der Unterschied zwischen den Massenanteilen ist in diesem Bereich sehr gering. Die größte Abweichung zwischen Berechnung und Messung ergibt sich bei der Siebfraktion >63mm. Hier ist bei der Messung fast der gesamte Massenanteil der Aufgabemenge im gereinigten Schotter, während bei der Berechnung der größte Teil dem Abraum zuzuordnen ist.

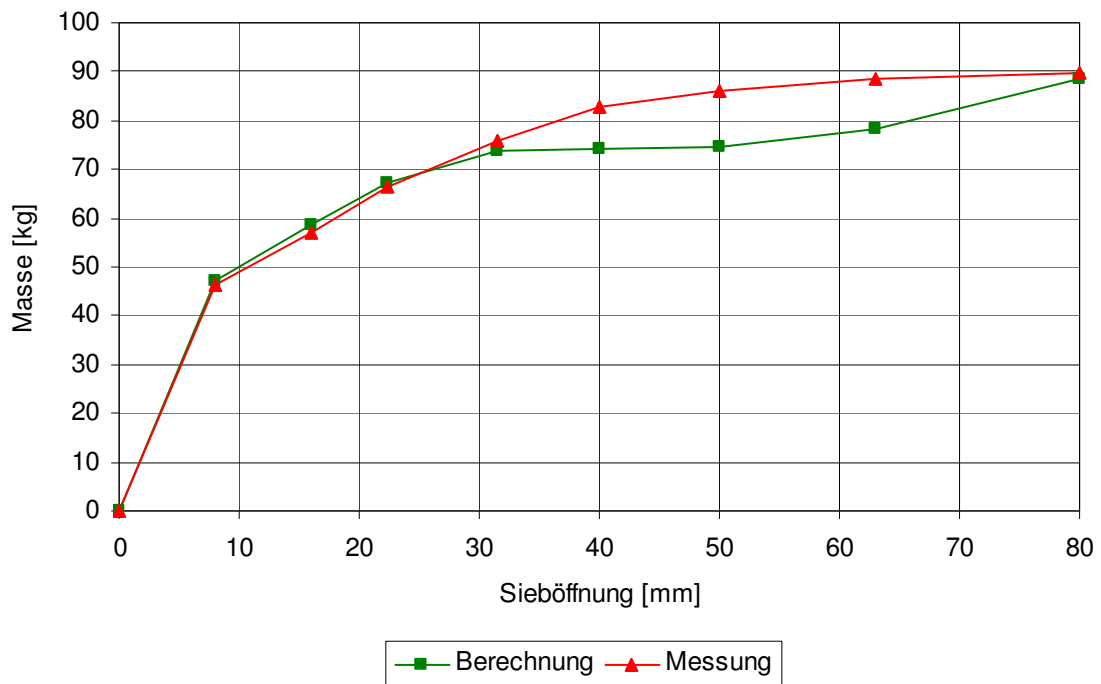


Abbildung 46: Summenkurve der Massenanteile – Bettungsrückstand

Aus Abbildung 46 ist ersichtlich, dass beim Siebmodell der Anteil an gebrauchsfähigem Schotter (Kornfraktion 22,4 – 63mm) im Bettungsrückstand geringer ist, als bei den Untersuchungen gemessen wurde. Im Protokoll der Siebuntersuchungsergebnisse (Anhang I) wird darauf hingewiesen, dass der hohe Anteil an gebrauchsfähigem Schotter auf das Überspringen des Schotters vom Überkorndeck auf das Hauptförderband bzw. Überkornschacht zurückzuführen ist. Um dies zu vermeiden, wurden am ersten Siebdeck technische Änderungen durchgeführt. Eine erneute Messung fand nicht statt. In der Praxis ist aus wirtschaftlicher Sicht ein so hoher Anteil an gebrauchsfähigem Schotter im Abraum nicht vertretbar.

10 Fazit und Ausblick

10.1 Anwendbarkeit des Modells

Ein Siebprozess wird von vielen Parametern beeinflusst, sodass eine exakte Vorausberechnung nahezu unmöglich ist. Das in dieser Diplomarbeit vorgestellte Modell ermöglicht eine angenäherte Berechnung des Prozesses. Bis auf die Abweichungen im Kornbereich zwischen 22,4 und 40 mm (die wie im vorigen Kapitel beschrieben erklärbar sind) und die Abweichungen im Bereich $>63\text{mm}$ deckt sich die Berechnung mit der Praxis. Um eine exakte Aussage bezüglich Anwendbarkeit des Modells zu treffen, müssten Messungen bei den aktuell im Einsatz befindlichen Maschinen durchgeführt werden. Mit neuen Untersuchungsergebnissen kann man die Anwendbarkeit des Modells bestätigen oder eventuell notwendige Anpassungen durchführen. Je genauer Modell und Praxis übereinstimmen, desto exakter kann man Aussagen über die Einflussgrößen beim Siebvorgang treffen. Das hier vorgestellte Siebmodell beinhaltet die wichtigsten Parameter, die einen Einfluss auf den Siebprozess haben. Bei Plasser & Theurer Wurfsieben variieren zwischen den einzelnen Modellen hauptsächlich die Parameter Maschenweite, Siebbodenlänge, Neigungswinkel und Antriebsdrehzahl. Am Berechnungsmodell lassen sich die Parameter relativ einfach verstellen und somit kann man deren Einfluss beurteilen.

Vom Aufbau her kann die Modellrechnung auch auf Kreisschwinger (Exzentrerschwingsiebe; Kreiswuchtschwingsiebe) übertragen werden. Bei Kreisschwingern ist der Siebboden zum Erreichen einer geeigneten Transportgeschwindigkeit stärker geneigt als bei Linearschwinger. Durch diese starke Neigung und die Kreisbewegung tritt eine scheinbare Verkleinerung der Maschenweite auf. Es müsste überprüft werden, inwieweit diese für die Berechnung einen Einfluss hat. Für Exzentrerschwingsiebe entfällt die Berechnung der Materialmenge am Sieb, da diese lastunabhängig arbeiten.

10.2 Möglichkeiten der Weiterentwicklung

Das hier vorgestellte Siebmodell setzt optimale Betriebsbedingungen voraus. Das heißt, das Aushubmaterial liegt im trockenen Zustand vor und es kommt auf den Siebböden zu keinen Verklumpungen und Verlegungen von Maschen. In der Praxis herrschen aber unterschiedliche Bedingungen. Das Aushubmaterial kann feucht sein und mit bindigem Material (Lehm) vermischt sein. Unter diesen Voraussetzungen ist das Siebgut erheblich schwieriger zu reinigen. Es kann nicht mit voller Leistung gefahren werden. Für das Siebmodell könnte man einen Parameter definieren, der den Zustand des Aushubmaterials beschreibt.

Durch den übersichtlichen und einfachen Aufbau des Modells lassen sich zusätzliche Parameter und neue Erkenntnisse rasch einbinden.

Literaturverzeichnis

FAG: Spezial-Pendelrollenlager für Schwingmaschinen, Ausgabe 2011

Ferrara, G.; Preti, U.; Schena, G. D.: Modelling of Screening Operations, International Journal of Mineral Processing 22, 1988, S.193-222

Höfft, Karl: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen, 1.Aufl., Berlin: Springer, 1986

Jansen, M. L.; Glasonbury, J. R.: The Size Separation of Particles by Screening, Powder Technology 1, 1967/68, S.334-343

Klockhaus, W.: Fördergeschwindigkeit von Schwingrinnen und Schwingsieben, Erdöl und Kohle, 5.Jahrgang Nr.8, 1952, S.493-495

Klotzinger, Erwin: Der Oberbauschotter Teil 2: Qualitätsverlauf und Eingriffsschwellen, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (57) 3/2008a, S.120-125

Klotzinger, Erwin: Der Oberbauschotter Teil 1: Anforderungen und Beanspruchung, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (57) 1+2/2008b, S.34-41

Kluge, W.: Neuzeitliche Siebmaschinen für die Aufbereitung, Erdöl und Kohle, 4.Jahrgang Nr.11, 1951, S.705-711

Lange, Rainer: Dimensionsanalytische Behandlung der Siebung am kreisförmig schwingenden Wurfsieb, - 1997, - 112 S., Essen, Universität, Maschinenwesen, Dissertation, 1997

Lichtberger, Bernhard: Das System Gleis, Optimierungspotenziale aus Sicht des Instandhalters, - EIK – Eisenbahningenieurkalender 2009, S.33-52

Lichtberger, Bernhard: Handbuch Gleis, 3.überarb. Neuaufl., Hamburg: Eurailpress, 2010

Meinel, Achim: Klassierung auf Stößelschwingsieben, 1.Aufl., Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1974

Meinel, Achim: Zur Rolle und Optimierung der Siebboden- und Siebgutbewegung auf Wurfsiebmaschinen, Aufbereitungstechnik 46 Nr.7, 2004, S.42-62

- Meinel, Achim: Zur Theorie und Praxis des Siebbodeneinsatzes in der Wurfsiebung, Aufbereitungstechnik 46 Nr.7, 2005, S.4-22
- Misar, Helmut: Kriterien für eine wirtschaftliche Bettungsreinigung, EI – Eisenbahningenieur (55) 8/2004, S.47-52
- ÖBB, Technische Lieferbedingungen für Oberbauschotter, BH700, Ausgabe 1998
- ORE FRAGE D 182, Bericht Nr.2: Beurteilung des Schotterzustandes im Gleis, Utrecht, Oktober 1991, S.32-33
- Salzer, Gert: Stetigförderer Teil 1, Buchreihe fördern und heben, Mainz: Krauskopf, 1964
- Schmidt, Paul: Siebklassieren, Chem.-Ing.-Techn. 56 (12), 1984, S.897-907
- Schmidt, Paul; Fischer, Manfred; Coppers Matthias: Rhewum Siebfibel, Remscheid 1995
- Schmidt, Paul; Körber, Rolf; Coppers, Matthias: Sieben und Siebmaschinen, 1.Aufl., Weinheim: Wiley-VCH, 2003
- Schubert, Heinrich: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Band I, 4.überarb. Aufl., Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1989
- Schubert, Heinrich: Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik, Band 2, 1.Aufl., Weinheim: Wiley-VCH, 2003
- Standish, N.: The Kinetics of Batch Sieving, Powder Technology 41, 1985a, S.57-67
- Standish, N.: Some Kinetic Aspects of Continuous Screening, Powder Technology 41, 1985b, S.165-171
- Stieß, Matthias: Mechanische Verfahrenstechnik – Partikeltechnologie 1, 3.überarb. Aufl., Berlin: Springer, 2009
- Wenty, Rainer: Neueste Entwicklungen bei der Gleissanierung und – instandsetzung, EI – Eisenbahningenieur (57) 11/2006a, S.6-11
- Wenty, Rainer: Hochleistung, Präzision und Zuverlässigkeit in der Gleisinstandhaltung, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (55) 6/2006b, S.379-388

Anhang I: Siebuntersuchungsprotokoll

RM80-VRCh1-230

10.7.1984

Sieb-Untersuchungsergebnisse

Strecke	Mühlkreisbahn
km	ca. 1,500
	Gerade
Witterung	sonnig, trocken, +28°C
Verschmutzungsgrad	sehr stark verschmutzt
Reinigungstiefe	46 cm
unter OK Schwelle	
Arbeitsgeschwindigkeit	> 300 m/h
	mit Planiervorrichtung
Siebgrößen (mm)	
Oberdeck	80
Mitteldeck Stahl	55
Unterdeck	35
Siebfrequenz	20 Hz

Beurteilung:

1. Gereinigter Schotter:

Sehr gute Reinigung.

2. Abraum:

Der hohe Gut-Kornanteil ist auf das Überspringen des Schotters vom Überkorndeck auf das Hauptförderband bzw. in den Überkornschacht zurückzuführen. Abhilfe: Gummileiste am oberen Ende des Überkorndecks erhöhen und höheren Kaskadenwinkel etwa in der Mitte anbringen.

RM80-VRCh1-230

10.7.1984

ca. km 1,500

**Kornzusammensetzung des
gereinigten Schotters**

Siebfraktion in Ø mm	kg	%
0-25	2,25	2,7
25-30	1,4	1,7
30-35	10,4	12,8
35-40	16,9	20,8
40-50	23,7	29,2
50-60	14,6	18,0
65-69	7,6	9,4
65-≥ 70	4,4	5,4
	<hr/> 31,25 kg	<hr/> 100 %

RM80-VRCh1-230

10.7.19⁸⁴Kornzusammensetzung der
Bettungsrückstände

Siebfraktion in Ø mm	kg	%
0-5	48,9	47,8
5-10	6,4	6,3
10-20	16,0	15,7
20-25	9,0	8,8
25-30	3,8	3,7
30-35	8,2	8,0
35-40	2,2	2,1
40-50	3,7	3,6
50-60	1,8	1,8
60-65	1,9	1,9
65-70	0,3	0,3
> 65	0	0
	<hr/> 102,2 kg	<hr/> 100 %

Anhang II: Übersicht Materialmenge - Aufgabeleistung

m_{Mat} [kg]	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
e [mm]	4,46	4,41	4,35	4,29	4,24	4,19	4,14	4,09	4,04	3,99
K	7,18	7,10	7,00	6,91	6,83	6,74	6,66	6,58	6,50	6,42
$K_{V,1}$	5,88	5,82	5,73	5,66	5,59	5,52	5,46	5,39	5,32	5,26
$K_{V,2}$	6,16	6,09	6,00	5,92	5,86	5,78	5,71	5,64	5,57	5,50
$K_{V,3}$	6,25	6,18	6,09	6,01	5,94	5,87	5,80	5,73	5,66	5,59
$\phi_{L,1}$ [rad]	0,171	0,173	0,175	0,178	0,180	0,182	0,184	0,187	0,189	0,191
$\phi_{L,2}$ [rad]	0,163	0,165	0,167	0,170	0,171	0,174	0,176	0,178	0,181	0,183
$\phi_{L,3}$ [rad]	0,161	0,163	0,165	0,167	0,169	0,171	0,173	0,175	0,178	0,180
$\phi_{0,1}$ [rad]	12,40	12,30	12,20	12,00	12,00	11,80	11,80	11,70	11,60	11,50
$\phi_{0,2}$ [rad]	12,60	12,60	12,50	12,40	12,30	12,30	12,20	12,00	12,00	11,80
$\phi_{0,3}$ [rad]	12,70	12,60	12,60	12,50	12,40	12,40	12,30	12,20	12,00	12,00
$v_{T,1}$ [m/s]	0,406	0,399	0,393	0,379	0,379	0,367	0,366	0,360	0,354	0,347
$v_{T,2}$ [m/s]	0,405	0,405	0,399	0,392	0,385	0,385	0,379	0,366	0,366	0,354
$v_{T,3}$ [m/s]	0,407	0,401	0,401	0,394	0,388	0,387	0,381	0,374	0,362	0,362
$v_{T,2,3}$ [m/s]	0,406	0,403	0,400	0,393	0,387	0,386	0,380	0,370	0,364	0,358
Q_A [m ³ /h]	194	225	255	282	309	339	363	383	406	428

m_{Mat} [kg]	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500
e [mm]	3,94	3,90	3,85	3,81	3,77	3,72	3,68	3,64	3,60	3,57
K	6,34	6,28	6,20	6,13	6,07	5,99	5,92	5,86	5,79	5,75
$K_{V,1}$	5,19	5,14	5,08	5,02	4,97	4,91	4,85	4,80	4,74	4,71
$K_{V,2}$	5,44	5,38	5,32	5,26	5,20	5,14	5,08	5,02	4,96	4,93
$K_{V,3}$	5,52	5,47	5,40	5,34	5,28	5,21	5,15	5,10	5,04	5,00
$\phi_{L,1}$ [rad]	0,194	0,196	0,198	0,201	0,203	0,205	0,208	0,210	0,213	0,214
$\phi_{L,2}$ [rad]	0,185	0,187	0,189	0,191	0,194	0,196	0,198	0,201	0,203	0,204
$\phi_{L,3}$ [rad]	0,182	0,184	0,186	0,188	0,191	0,193	0,195	0,197	0,200	0,201
$\phi_{0,1}$ [rad]	11,40	11,30	11,20	11,00	10,90	10,80	10,70	10,50	10,40	10,00
$\phi_{0,2}$ [rad]	11,80	11,70	11,60	11,50	11,40	11,30	11,20	11,00	10,90	10,80
$\phi_{0,3}$ [rad]	11,80	11,80	11,70	11,60	11,50	11,40	11,30	11,20	11,10	11,00
$v_{T,1}$ [m/s]	0,341	0,335	0,328	0,317	0,311	0,304	0,299	0,287	0,282	0,260
$v_{T,2}$ [m/s]	0,353	0,347	0,341	0,335	0,329	0,323	0,317	0,306	0,300	0,294
$v_{T,3}$ [m/s]	0,350	0,349	0,343	0,337	0,331	0,325	0,320	0,314	0,308	0,302
$v_{T,2,3}$ [m/s]	0,352	0,348	0,342	0,336	0,330	0,324	0,319	0,310	0,304	0,298
Q_A [m ³ /h]	449	472	491	509	526	543	559	569	582	594

Anhang III: Berechnete Werte - Siebdeck 1

Korngröße	Abschnitt													
	1		2		3		4		5		6		7	
	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L
1	0,202	1,340	0,212	1,494	0,235	1,856	0,263	2,417	0,299	3,282	0,348	4,658	0,413	7,032
2	0,197	1,303	0,207	1,454	0,229	1,802	0,257	2,353	0,292	3,191	0,339	4,508	0,403	6,809
3	0,192	1,266	0,202	1,415	0,223	1,749	0,250	2,278	0,284	3,087	0,330	4,361	0,392	6,568
4	0,187	1,230	0,196	1,368	0,218	1,704	0,244	2,215	0,277	2,997	0,322	4,232	0,382	6,353
5	0,183	1,201	0,192	1,337	0,212	1,651	0,238	2,153	0,270	2,908	0,314	4,104	0,372	6,141
6	0,178	1,164	0,186	1,290	0,206	1,599	0,231	2,080	0,263	2,820	0,305	3,962	0,362	5,932
7	0,173	1,128	0,181	1,252	0,201	1,555	0,225	2,019	0,256	2,732	0,297	3,838	0,353	5,747
8	0,168	1,093	0,176	1,214	0,195	1,503	0,219	1,958	0,248	2,634	0,289	3,714	0,343	5,545
9	0,164	1,064	0,172	1,183	0,190	1,460	0,213	1,897	0,242	2,560	0,281	3,593	0,334	5,365
10	0,159	1,029	0,167	1,146	0,185	1,418	0,207	1,837	0,235	2,475	0,273	3,472	0,324	5,169
11	0,155	1,000	0,162	1,108	0,180	1,375	0,201	1,777	0,228	2,391	0,266	3,368	0,315	4,994
12	0,150	0,965	0,157	1,071	0,174	1,325	0,195	1,718	0,222	2,320	0,258	3,250	0,306	4,822
13	0,145	0,931	0,153	1,041	0,169	1,283	0,189	1,659	0,215	2,237	0,250	3,133	0,297	4,652
14	0,141	0,903	0,148	1,004	0,164	1,241	0,184	1,610	0,209	2,166	0,243	3,032	0,288	4,484
15	0,137	0,875	0,144	0,975	0,159	1,200	0,178	1,552	0,202	2,085	0,236	2,931	0,279	4,318
16	0,133	0,848	0,139	0,938	0,154	1,159	0,173	1,504	0,196	2,016	0,228	2,818	0,271	4,172
17	0,129	0,820	0,135	0,909	0,150	1,126	0,168	1,457	0,190	1,947	0,221	2,720	0,263	4,028
18	0,125	0,793	0,131	0,880	0,145	1,086	0,162	1,400	0,184	1,879	0,214	2,622	0,254	3,868
19	0,121	0,766	0,127	0,852	0,140	1,045	0,157	1,353	0,179	1,822	0,208	2,539	0,246	3,727
20	0,117	0,739	0,122	0,816	0,136	1,013	0,152	1,306	0,172	1,744	0,201	2,444	0,238	3,588
21	0,113	0,712	0,118	0,787	0,131	0,973	0,147	1,259	0,167	1,688	0,194	2,349	0,230	3,450
22	0,109	0,686	0,114	0,759	0,127	0,941	0,142	1,213	0,161	1,622	0,187	2,254	0,222	3,314
23	0,105	0,659	0,111	0,738	0,122	0,902	0,137	1,167	0,156	1,567	0,181	2,174	0,215	3,195
24	0,102	0,639	0,107	0,710	0,118	0,870	0,133	1,130	0,151	1,513	0,175	2,095	0,208	3,078
25	0,098	0,613	0,103	0,682	0,114	0,839	0,128	1,085	0,145	1,447	0,169	2,016	0,200	2,945
26	0,095	0,593	0,099	0,654	0,110	0,808	0,123	1,039	0,140	1,394	0,163	1,938	0,193	2,830
27	0,091	0,567	0,096	0,633	0,106	0,777	0,119	1,003	0,135	1,340	0,157	1,860	0,186	2,716
28	0,088	0,547	0,092	0,605	0,102	0,746	0,114	0,959	0,129	1,276	0,151	1,783	0,179	2,603
29	0,084	0,521	0,088	0,578	0,098	0,715	0,110	0,923	0,125	1,234	0,145	1,706	0,172	2,491
30	0,081	0,502	0,085	0,557	0,094	0,684	0,105	0,879	0,120	1,181	0,139	1,630	0,165	2,380
31	0,078	0,482	0,082	0,536	0,091	0,661	0,101	0,843	0,115	1,129	0,134	1,567	0,159	2,286
32	0,075	0,463	0,078	0,509	0,087	0,631	0,097	0,808	0,110	1,077	0,128	1,492	0,152	2,176
33	0,072	0,444	0,075	0,489	0,083	0,600	0,093	0,773	0,106	1,035	0,123	1,429	0,146	2,083
34	0,069	0,425	0,072	0,469	0,080	0,578	0,089	0,738	0,101	0,984	0,118	1,367	0,140	1,991
35	0,066	0,406	0,069	0,448	0,076	0,548	0,085	0,704	0,097	0,943	0,113	1,306	0,134	1,899
36	0,063	0,387	0,066	0,428	0,073	0,525	0,082	0,678	0,093	0,902	0,108	1,245	0,128	1,808
37	0,060	0,368	0,063	0,408	0,070	0,503	0,078	0,643	0,088	0,851	0,103	1,184	0,122	1,717
38	0,057	0,349	0,060	0,388	0,066	0,473	0,074	0,609	0,084	0,811	0,098	1,123	0,116	1,628
39	0,055	0,336	0,057	0,368	0,063	0,451	0,071	0,583	0,081	0,780	0,094	1,075	0,111	1,553
40	0,052	0,317	0,054	0,348	0,060	0,429	0,068	0,558	0,077	0,740	0,089	1,015	0,106	1,479

Korngröße	Abschnitt													
	1		2		3		4		5		6		7	
	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L
41	0,049	0,298	0,052	0,335	0,057	0,407	0,064	0,524	0,073	0,700	0,085	0,967	0,101	1,405
42	0,047	0,286	0,049	0,315	0,055	0,392	0,061	0,498	0,069	0,661	0,081	0,920	0,096	1,332
43	0,044	0,267	0,047	0,302	0,052	0,370	0,058	0,473	0,066	0,631	0,076	0,861	0,091	1,259
44	0,042	0,255	0,044	0,282	0,049	0,348	0,055	0,448	0,062	0,591	0,072	0,814	0,086	1,187
45	0,040	0,242	0,042	0,269	0,046	0,326	0,052	0,423	0,059	0,562	0,068	0,767	0,081	1,115
46	0,038	0,230	0,039	0,249	0,044	0,312	0,049	0,398	0,056	0,532	0,065	0,732	0,077	1,058
47	0,035	0,212	0,037	0,236	0,041	0,290	0,046	0,373	0,052	0,493	0,061	0,685	0,072	0,986
48	0,033	0,199	0,035	0,223	0,039	0,276	0,043	0,348	0,049	0,464	0,057	0,639	0,068	0,930
49	0,031	0,187	0,033	0,210	0,036	0,254	0,041	0,332	0,046	0,435	0,054	0,605	0,064	0,873
50	0,029	0,175	0,031	0,197	0,034	0,240	0,038	0,307	0,043	0,406	0,050	0,559	0,059	0,803
51	0,027	0,163	0,029	0,185	0,032	0,225	0,035	0,282	0,040	0,377	0,047	0,524	0,055	0,747
52	0,026	0,156	0,027	0,172	0,030	0,211	0,033	0,266	0,038	0,358	0,044	0,490	0,052	0,705
53	0,024	0,144	0,025	0,159	0,027	0,190	0,031	0,249	0,035	0,329	0,041	0,456	0,048	0,649
54	0,022	0,132	0,023	0,146	0,026	0,183	0,029	0,233	0,032	0,301	0,038	0,422	0,045	0,608
55	0,020	0,120	0,021	0,133	0,024	0,168	0,026	0,209	0,030	0,281	0,035	0,388	0,041	0,553
56	0,019	0,114	0,020	0,127	0,022	0,154	0,024	0,192	0,028	0,262	0,032	0,354	0,038	0,511
57	0,017	0,102	0,018	0,114	0,020	0,140	0,023	0,184	0,026	0,243	0,030	0,332	0,035	0,470
58	0,016	0,096	0,016	0,101	0,018	0,126	0,020	0,160	0,023	0,215	0,027	0,298	0,032	0,429
59	0,014	0,084	0,015	0,095	0,017	0,119	0,019	0,152	0,021	0,196	0,025	0,276	0,029	0,388
60	0,013	0,078	0,014	0,088	0,015	0,105	0,017	0,136	0,019	0,177	0,022	0,242	0,026	0,348
61	0,012	0,072	0,012	0,076	0,014	0,098	0,015	0,120	0,017	0,158	0,020	0,220	0,024	0,321
62	0,010	0,060	0,011	0,069	0,012	0,084	0,014	0,112	0,015	0,140	0,018	0,198	0,021	0,280
63	0,009	0,054	0,010	0,063	0,011	0,077	0,012	0,096	0,014	0,130	0,016	0,176	0,019	0,253
64	0,001	0,006	0,001	0,006	0,001	0,007	0,001	0,008	0,001	0,009	0,002	0,022	0,003	0,040
65	0,000	0,000	0,001	0,006	0,001	0,007	0,001	0,008	0,001	0,009	0,002	0,022	0,002	0,026
66	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,007	0,001	0,008	0,001	0,009	0,001	0,011	0,002	0,026
67	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,008	0,001	0,009	0,001	0,011	0,002	0,026
68	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,008	0,001	0,009	0,001	0,011	0,001	0,013
69	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,009	0,001	0,011	0,001	0,013
70	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,011	0,001	0,013
71	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,011	0,001	0,013
72	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,013
73	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,013
74	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
75	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
76	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
77	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
78	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
79	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Korngröße	Abschnitt													
	8		9		10		11		12		13		14	
	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L
1	0,501	11,699	0,574	17,459	0,517	14,890	0,465	12,797	0,422	11,216	0,384	9,913	0,353	8,908
2	0,489	11,299	0,560	16,797	0,504	14,346	0,454	12,381	0,411	10,830	0,375	9,616	0,344	8,626
3	0,476	10,877	0,545	16,111	0,491	13,817	0,442	11,936	0,400	10,451	0,365	9,292	0,335	8,347
4	0,464	10,496	0,531	15,491	0,478	13,301	0,430	11,501	0,390	10,113	0,355	8,972	0,327	8,102
5	0,452	10,123	0,518	14,932	0,466	12,836	0,420	11,145	0,380	9,781	0,346	8,688	0,319	7,861
6	0,440	9,758	0,504	14,346	0,454	12,381	0,408	10,726	0,370	9,453	0,337	8,409	0,310	7,592
7	0,428	9,402	0,491	13,817	0,442	11,936	0,398	10,383	0,360	9,131	0,328	8,133	0,302	7,356
8	0,416	9,052	0,477	13,262	0,429	11,465	0,386	9,980	0,350	8,814	0,319	7,861	0,293	7,094
9	0,405	8,738	0,464	12,759	0,418	11,075	0,376	9,649	0,341	8,532	0,311	7,622	0,285	6,864
10	0,394	8,430	0,451	12,269	0,406	10,657	0,365	9,292	0,331	8,224	0,302	7,356	0,277	6,636
11	0,383	8,127	0,439	11,827	0,395	10,282	0,355	8,972	0,322	7,951	0,293	7,094	0,270	6,439
12	0,371	7,803	0,425	11,322	0,383	9,880	0,345	8,657	0,312	7,651	0,284	6,835	0,262	6,216
13	0,360	7,511	0,413	10,900	0,372	9,518	0,334	8,316	0,303	7,385	0,276	6,608	0,254	5,995
14	0,350	7,250	0,401	10,486	0,361	9,163	0,325	8,042	0,295	7,152	0,268	6,383	0,247	5,804
15	0,339	6,968	0,389	10,080	0,350	8,814	0,315	7,741	0,285	6,864	0,260	6,161	0,239	5,588
16	0,329	6,715	0,377	9,682	0,339	8,470	0,305	7,444	0,277	6,636	0,252	5,941	0,232	5,401
17	0,319	6,466	0,365	9,292	0,329	8,163	0,296	7,181	0,268	6,383	0,244	5,723	0,225	5,215
18	0,309	6,221	0,354	8,940	0,318	7,831	0,286	6,892	0,260	6,161	0,237	5,534	0,217	5,005
19	0,299	5,979	0,343	8,595	0,308	7,533	0,278	6,664	0,252	5,941	0,229	5,321	0,211	4,849
20	0,289	5,740	0,331	8,224	0,298	7,239	0,268	6,383	0,243	5,696	0,221	5,110	0,204	4,668
21	0,279	5,505	0,320	7,891	0,288	6,950	0,259	6,133	0,235	5,481	0,214	4,927	0,197	4,489
22	0,270	5,297	0,309	7,562	0,278	6,664	0,251	5,913	0,227	5,268	0,207	4,745	0,190	4,311
23	0,261	5,090	0,299	7,268	0,269	6,411	0,242	5,669	0,220	5,084	0,200	4,566	0,184	4,160
24	0,252	4,887	0,289	6,979	0,260	6,161	0,234	5,454	0,212	4,875	0,193	4,387	0,178	4,010
25	0,243	4,685	0,278	6,664	0,250	5,886	0,225	5,215	0,204	4,668	0,186	4,211	0,171	3,837
26	0,235	4,508	0,269	6,411	0,242	5,669	0,218	5,031	0,197	4,489	0,180	4,060	0,165	3,689
27	0,226	4,312	0,259	6,133	0,233	5,427	0,209	4,797	0,190	4,311	0,173	3,886	0,159	3,543
28	0,217	4,117	0,249	5,859	0,224	5,189	0,201	4,591	0,182	4,110	0,166	3,714	0,153	3,397
29	0,209	3,946	0,239	5,588	0,215	4,953	0,194	4,413	0,176	3,961	0,160	3,567	0,147	3,253
30	0,201	3,777	0,230	5,348	0,207	4,745	0,186	4,211	0,169	3,788	0,154	3,422	0,141	3,110
31	0,193	3,609	0,221	5,110	0,199	4,540	0,179	4,035	0,162	3,616	0,148	3,277	0,136	2,991
32	0,185	3,443	0,212	4,875	0,191	4,337	0,172	3,862	0,156	3,470	0,142	3,133	0,130	2,849
33	0,177	3,278	0,203	4,642	0,183	4,135	0,165	3,689	0,149	3,301	0,136	2,991	0,125	2,732
34	0,170	3,136	0,195	4,438	0,175	3,936	0,158	3,519	0,143	3,157	0,130	2,849	0,120	2,615
35	0,163	2,995	0,186	4,211	0,168	3,763	0,151	3,349	0,137	3,015	0,125	2,732	0,114	2,476
36	0,156	2,854	0,178	4,010	0,161	3,592	0,144	3,181	0,131	2,873	0,119	2,592	0,110	2,384
37	0,148	2,696	0,170	3,812	0,153	3,397	0,138	3,038	0,125	2,732	0,114	2,476	0,104	2,247
38	0,141	2,558	0,162	3,616	0,146	3,229	0,131	2,873	0,119	2,592	0,108	2,338	0,100	2,156
39	0,135	2,441	0,155	3,446	0,139	3,062	0,126	2,755	0,114	2,476	0,104	2,247	0,095	2,042
40	0,129	2,324	0,147	3,253	0,132	2,896	0,119	2,592	0,108	2,338	0,098	2,110	0,091	1,952

Korngröße	Abschnitt													
	8		9		10		11		12		13		14	
	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L
41	0,122	2,190	0,140	3,086	0,126	2,755	0,114	2,476	0,103	2,224	0,094	2,020	0,086	1,840
42	0,116	2,075	0,133	2,920	0,120	2,615	0,108	2,338	0,098	2,110	0,089	1,907	0,082	1,751
43	0,110	1,961	0,126	2,755	0,114	2,476	0,102	2,201	0,093	1,997	0,084	1,795	0,078	1,662
44	0,104	1,848	0,119	2,592	0,107	2,315	0,097	2,088	0,088	1,885	0,080	1,706	0,073	1,551
45	0,099	1,755	0,113	2,453	0,102	2,201	0,091	1,952	0,083	1,773	0,076	1,617	0,069	1,463
46	0,093	1,643	0,107	2,315	0,096	2,065	0,086	1,840	0,078	1,662	0,071	1,507	0,066	1,397
47	0,088	1,550	0,100	2,156	0,090	1,930	0,081	1,728	0,074	1,573	0,067	1,419	0,062	1,310
48	0,082	1,440	0,094	2,020	0,085	1,817	0,076	1,617	0,069	1,463	0,063	1,331	0,058	1,222
49	0,078	1,367	0,089	1,907	0,080	1,706	0,072	1,529	0,065	1,375	0,059	1,244	0,055	1,157
50	0,072	1,258	0,083	1,773	0,074	1,573	0,067	1,419	0,061	1,288	0,055	1,157	0,051	1,071
51	0,067	1,167	0,077	1,639	0,069	1,463	0,062	1,310	0,057	1,201	0,052	1,093	0,047	0,985
52	0,063	1,095	0,072	1,529	0,065	1,375	0,059	1,244	0,053	1,114	0,048	1,006	0,045	0,942
53	0,058	1,006	0,067	1,419	0,060	1,266	0,054	1,136	0,049	1,028	0,045	0,942	0,041	0,857
54	0,054	0,934	0,062	1,310	0,056	1,179	0,050	1,049	0,046	0,963	0,042	0,878	0,038	0,793
55	0,050	0,863	0,058	1,222	0,052	1,093	0,047	0,985	0,042	0,878	0,039	0,814	0,035	0,729
56	0,046	0,793	0,053	1,114	0,048	1,006	0,043	0,899	0,039	0,814	0,035	0,729	0,033	0,687
57	0,043	0,740	0,049	1,028	0,044	0,921	0,040	0,835	0,036	0,750	0,033	0,687	0,030	0,623
58	0,039	0,670	0,044	0,921	0,040	0,835	0,036	0,750	0,033	0,687	0,030	0,623	0,027	0,560
59	0,035	0,600	0,041	0,857	0,036	0,750	0,033	0,687	0,030	0,623	0,027	0,560	0,025	0,518
60	0,032	0,547	0,037	0,771	0,033	0,687	0,030	0,623	0,027	0,560	0,024	0,497	0,023	0,476
61	0,029	0,495	0,033	0,687	0,030	0,623	0,027	0,560	0,025	0,518	0,022	0,455	0,021	0,434
62	0,026	0,443	0,030	0,623	0,027	0,560	0,024	0,497	0,022	0,455	0,020	0,413	0,018	0,372
63	0,023	0,392	0,026	0,539	0,024	0,497	0,021	0,434	0,019	0,392	0,018	0,372	0,016	0,330
64	0,004	0,067	0,007	0,144	0,009	0,185	0,011	0,226	0,013	0,268	0,014	0,288	0,016	0,330
65	0,004	0,067	0,006	0,123	0,008	0,164	0,010	0,206	0,012	0,247	0,013	0,268	0,014	0,288
66	0,003	0,051	0,005	0,103	0,007	0,144	0,008	0,164	0,010	0,206	0,011	0,226	0,012	0,247
67	0,003	0,051	0,004	0,082	0,006	0,123	0,007	0,144	0,009	0,185	0,010	0,206	0,010	0,206
68	0,002	0,034	0,004	0,082	0,005	0,103	0,006	0,123	0,007	0,144	0,008	0,164	0,009	0,185
69	0,002	0,034	0,003	0,061	0,004	0,082	0,005	0,103	0,006	0,123	0,007	0,144	0,007	0,144
70	0,002	0,034	0,003	0,061	0,004	0,082	0,004	0,082	0,005	0,103	0,006	0,123	0,006	0,123
71	0,001	0,017	0,002	0,041	0,003	0,061	0,004	0,082	0,004	0,082	0,005	0,103	0,005	0,103
72	0,001	0,017	0,002	0,041	0,002	0,041	0,003	0,061	0,003	0,061	0,004	0,082	0,004	0,082
73	0,001	0,017	0,001	0,020	0,002	0,041	0,002	0,041	0,003	0,061	0,003	0,061	0,003	0,061
74	0,001	0,017	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,002	0,041	0,002	0,041	0,002	0,041
75	0,000	0,000	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,002	0,041
76	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020
77	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,020
78	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
79	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Korngröße	Abschnitt													
	15		16		17		18		19		20		21	
	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L
1	0,326	8,072	0,304	7,415	0,284	6,835	0,267	6,355	0,252	5,941	0,240	5,615	0,228	5,294
2	0,318	7,831	0,296	7,181	0,277	6,636	0,260	6,161	0,246	5,777	0,234	5,454	0,222	5,136
3	0,309	7,562	0,288	6,950	0,270	6,439	0,253	5,968	0,239	5,588	0,228	5,294	0,216	4,979
4	0,301	7,327	0,281	6,750	0,263	6,244	0,247	5,804	0,233	5,427	0,222	5,136	0,211	4,849
5	0,294	7,123	0,274	6,551	0,256	6,050	0,241	5,642	0,227	5,268	0,216	4,979	0,205	4,694
6	0,286	6,892	0,267	6,355	0,249	5,859	0,234	5,454	0,221	5,110	0,210	4,823	0,200	4,566
7	0,278	6,664	0,260	6,161	0,243	5,696	0,228	5,294	0,215	4,953	0,205	4,694	0,195	4,438
8	0,271	6,467	0,252	5,941	0,236	5,508	0,222	5,136	0,209	4,797	0,199	4,540	0,189	4,286
9	0,263	6,244	0,246	5,777	0,229	5,321	0,216	4,979	0,204	4,668	0,194	4,413	0,184	4,160
10	0,256	6,050	0,239	5,588	0,223	5,162	0,210	4,823	0,198	4,514	0,188	4,261	0,179	4,035
11	0,249	5,859	0,232	5,401	0,217	5,005	0,204	4,668	0,193	4,387	0,183	4,135	0,174	3,911
12	0,241	5,642	0,225	5,215	0,210	4,823	0,198	4,514	0,187	4,236	0,177	3,986	0,169	3,788
13	0,234	5,454	0,218	5,031	0,204	4,668	0,192	4,362	0,181	4,085	0,172	3,862	0,164	3,665
14	0,228	5,294	0,212	4,875	0,198	4,514	0,186	4,211	0,176	3,961	0,167	3,738	0,159	3,543
15	0,221	5,110	0,206	4,720	0,192	4,362	0,181	4,085	0,171	3,837	0,162	3,616	0,154	3,422
16	0,214	4,927	0,199	4,540	0,186	4,211	0,175	3,936	0,166	3,714	0,157	3,494	0,150	3,325
17	0,207	4,745	0,193	4,387	0,181	4,085	0,170	3,812	0,160	3,567	0,152	3,373	0,145	3,205
18	0,201	4,591	0,187	4,236	0,175	3,936	0,164	3,665	0,155	3,446	0,148	3,277	0,140	3,086
19	0,194	4,413	0,181	4,085	0,169	3,788	0,159	3,543	0,150	3,325	0,143	3,157	0,136	2,991
20	0,188	4,261	0,175	3,936	0,164	3,665	0,154	3,422	0,145	3,205	0,138	3,038	0,131	2,873
21	0,182	4,110	0,169	3,788	0,158	3,519	0,149	3,301	0,141	3,110	0,134	2,944	0,127	2,779
22	0,175	3,936	0,164	3,665	0,153	3,397	0,144	3,181	0,136	2,991	0,129	2,826	0,123	2,685
23	0,170	3,812	0,158	3,519	0,148	3,277	0,139	3,062	0,131	2,873	0,125	2,732	0,119	2,592
24	0,164	3,665	0,153	3,397	0,143	3,157	0,134	2,944	0,127	2,779	0,121	2,639	0,115	2,500
25	0,158	3,519	0,147	3,253	0,137	3,015	0,129	2,826	0,122	2,662	0,116	2,523	0,110	2,384
26	0,152	3,373	0,142	3,133	0,133	2,920	0,125	2,732	0,118	2,569	0,112	2,430	0,107	2,315
27	0,147	3,253	0,137	3,015	0,128	2,802	0,120	2,615	0,114	2,476	0,108	2,338	0,103	2,224
28	0,141	3,110	0,131	2,873	0,123	2,685	0,115	2,500	0,109	2,361	0,104	2,247	0,099	2,133
29	0,136	2,991	0,126	2,755	0,118	2,569	0,111	2,407	0,105	2,270	0,100	2,156	0,095	2,042
30	0,130	2,849	0,122	2,662	0,114	2,476	0,107	2,315	0,101	2,178	0,096	2,065	0,091	1,952
31	0,126	2,755	0,117	2,546	0,109	2,361	0,103	2,224	0,097	2,088	0,092	1,975	0,088	1,885
32	0,120	2,615	0,112	2,430	0,105	2,270	0,098	2,110	0,093	1,997	0,088	1,885	0,084	1,795
33	0,115	2,500	0,108	2,338	0,100	2,156	0,094	2,020	0,089	1,907	0,085	1,817	0,081	1,728
34	0,111	2,407	0,103	2,224	0,096	2,065	0,091	1,952	0,086	1,840	0,081	1,728	0,077	1,639
35	0,106	2,293	0,098	2,110	0,092	1,975	0,087	1,862	0,082	1,751	0,078	1,662	0,074	1,573
36	0,101	2,178	0,094	2,020	0,088	1,885	0,083	1,773	0,078	1,662	0,074	1,573	0,071	1,507
37	0,096	2,065	0,090	1,930	0,084	1,795	0,079	1,684	0,075	1,595	0,071	1,507	0,067	1,419
38	0,092	1,975	0,086	1,840	0,080	1,706	0,075	1,595	0,071	1,507	0,068	1,441	0,064	1,353
39	0,088	1,885	0,082	1,751	0,077	1,639	0,072	1,529	0,068	1,441	0,065	1,375	0,061	1,288
40	0,084	1,795	0,078	1,662	0,073	1,551	0,068	1,441	0,065	1,375	0,061	1,288	0,058	1,222

Korngröße	Abschnitt													
	15		16		17		18		19		20		21	
	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L
41	0,080	1,706	0,074	1,573	0,069	1,463	0,065	1,375	0,062	1,310	0,059	1,244	0,056	1,179
42	0,076	1,617	0,070	1,485	0,066	1,397	0,062	1,310	0,058	1,222	0,056	1,179	0,053	1,114
43	0,072	1,529	0,067	1,419	0,062	1,310	0,059	1,244	0,055	1,157	0,053	1,114	0,050	1,049
44	0,068	1,441	0,063	1,331	0,059	1,244	0,055	1,157	0,052	1,093	0,050	1,049	0,047	0,985
45	0,064	1,353	0,060	1,266	0,056	1,179	0,052	1,093	0,050	1,049	0,047	0,985	0,045	0,942
46	0,061	1,288	0,056	1,179	0,053	1,114	0,050	1,049	0,047	0,985	0,045	0,942	0,042	0,878
47	0,057	1,201	0,053	1,114	0,050	1,049	0,047	0,985	0,044	0,921	0,042	0,878	0,040	0,835
48	0,053	1,114	0,050	1,049	0,047	0,985	0,044	0,921	0,041	0,857	0,039	0,814	0,037	0,771
49	0,050	1,049	0,047	0,985	0,044	0,921	0,041	0,857	0,039	0,814	0,037	0,771	0,035	0,729
50	0,047	0,985	0,044	0,921	0,041	0,857	0,038	0,793	0,036	0,750	0,034	0,708	0,033	0,687
51	0,044	0,921	0,041	0,857	0,038	0,793	0,036	0,750	0,034	0,708	0,032	0,665	0,031	0,644
52	0,041	0,857	0,038	0,793	0,036	0,750	0,034	0,708	0,032	0,665	0,030	0,623	0,029	0,602
53	0,038	0,793	0,035	0,729	0,033	0,687	0,031	0,644	0,029	0,602	0,028	0,581	0,027	0,560
54	0,035	0,729	0,033	0,687	0,031	0,644	0,029	0,602	0,027	0,560	0,026	0,539	0,025	0,518
55	0,033	0,687	0,030	0,623	0,028	0,581	0,027	0,560	0,025	0,518	0,024	0,497	0,023	0,476
56	0,030	0,623	0,028	0,581	0,026	0,539	0,025	0,518	0,023	0,476	0,022	0,455	0,021	0,434
57	0,028	0,581	0,026	0,539	0,024	0,497	0,023	0,476	0,022	0,455	0,020	0,413	0,019	0,392
58	0,025	0,518	0,023	0,476	0,022	0,455	0,021	0,434	0,019	0,392	0,019	0,392	0,018	0,372
59	0,023	0,476	0,021	0,434	0,020	0,413	0,019	0,392	0,018	0,372	0,017	0,351	0,016	0,330
60	0,021	0,434	0,019	0,392	0,018	0,372	0,017	0,351	0,016	0,330	0,015	0,309	0,015	0,309
61	0,019	0,392	0,018	0,372	0,017	0,351	0,016	0,330	0,015	0,309	0,014	0,288	0,013	0,268
62	0,017	0,351	0,016	0,330	0,015	0,309	0,014	0,288	0,013	0,268	0,012	0,247	0,012	0,247
63	0,015	0,309	0,014	0,288	0,013	0,268	0,012	0,247	0,012	0,247	0,011	0,226	0,011	0,226
64	0,017	0,351	0,018	0,372	0,018	0,372	0,019	0,392	0,020	0,413	0,020	0,413	0,021	0,434
65	0,015	0,309	0,016	0,330	0,017	0,351	0,017	0,351	0,018	0,372	0,018	0,372	0,019	0,392
66	0,013	0,268	0,014	0,288	0,014	0,288	0,015	0,309	0,015	0,309	0,016	0,330	0,016	0,330
67	0,011	0,226	0,012	0,247	0,012	0,247	0,013	0,268	0,013	0,268	0,014	0,288	0,014	0,288
68	0,009	0,185	0,010	0,206	0,010	0,206	0,011	0,226	0,011	0,226	0,011	0,226	0,012	0,247
69	0,008	0,164	0,008	0,164	0,009	0,185	0,009	0,185	0,009	0,185	0,009	0,185	0,010	0,206
70	0,007	0,144	0,007	0,144	0,007	0,144	0,008	0,164	0,008	0,164	0,008	0,164	0,008	0,164
71	0,006	0,123	0,006	0,123	0,006	0,123	0,006	0,123	0,007	0,144	0,007	0,144	0,007	0,144
72	0,004	0,082	0,005	0,103	0,005	0,103	0,005	0,103	0,005	0,103	0,005	0,103	0,006	0,123
73	0,003	0,061	0,004	0,082	0,004	0,082	0,004	0,082	0,004	0,082	0,004	0,082	0,004	0,082
74	0,002	0,041	0,002	0,041	0,002	0,041	0,003	0,061	0,003	0,061	0,003	0,061	0,003	0,061
75	0,002	0,041	0,002	0,041	0,002	0,041	0,002	0,041	0,002	0,041	0,002	0,041	0,002	0,041
76	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020
77	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020
78	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
79	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Abschnitt		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
L [m]		0-0,1	0,1-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,7-0,9	0,9-1,1	1,1-1,3	1,3-1,5	1,5-1,7	1,7-1,9	1,9-2,1
H [m]		0,274	0,260	0,233	0,206	0,179	0,151	0,124	0,098	0,073	0,053	0,042
V _{<8-63}		0,940	0,936	0,929	0,920	0,908	0,891	0,868	0,833	0,779	0,701	0,631
V _{>63}		0,060	0,064	0,071	0,080	0,092	0,109	0,132	0,167	0,221	0,299	0,369
ε		0,18	0,19	0,21	0,24	0,28	0,33	0,40	0,51	0,62	0,62	0,62
Fraktion <8	k _L	1,216	1,353	1,677	2,184	2,956	4,172	6,266	10,338	15,277	13,122	-
	m _{F,A}	47,49	42,05	32,08	22,94	14,82	8,21	3,56	1,02	0,13	0,01	-
	m _{F,D}	5,44	9,97	9,14	8,12	6,61	4,65	2,54	0,89	0,12	0,01	-
Fraktion 8-16	k _L	0,968	1,076	1,329	1,724	2,32	3,257	4,836	7,844	1,399	9,925	-
	m _{F,A}	11,98	10,87	8,77	6,72	4,76	2,99	1,56	0,59	0,12	0,01	-
	m _{F,D}	1,11	2,10	2,05	1,96	1,77	1,43	0,97	0,47	0,11	0,01	-
Fraktion 16-22,4	k _L	0,766	0,849	1,049	1,356	1,817	2,535	3,735	5,989	8,598	7,55	6,659
	m _{F,A}	10,44	9,67	8,16	6,62	5,05	3,51	2,11	1,00	0,30	0,05	0,01
	m _{F,D}	0,77	1,51	1,54	1,57	1,54	1,40	1,11	0,70	0,25	0,04	0,01
Fraktion 22,4-31,5	k _L	0,57	0,633	0,779	1,004	1,344	1,865	2,729	4,334	6,163	5,453	4,836
	m _{F,A}	17,94	16,95	14,93	12,78	10,46	7,99	5,50	3,19	1,34	0,39	0,13
	m _{F,D}	0,99	2,02	2,15	2,32	2,47	2,49	2,31	1,85	0,95	0,26	0,08
Fraktion 31,5-40	k _L	0,388	0,428	0,526	0,677	0,903	1,248	1,815	2,858	4,034	3,594	3,206
	m _{F,A}	49,58	47,69	43,78	39,41	34,42	28,73	22,38	15,57	8,79	3,92	1,91
	m _{F,D}	1,89	3,91	4,37	4,99	5,69	6,35	6,81	6,78	4,87	2,01	0,90
Fraktion 40-50	k _L	0,243	0,27	0,331	0,426	0,565	0,779	1,13	1,765	2,475	2,214	1,98
	m _{F,A}	45,06	43,98	41,67	39,00	35,81	31,98	27,37	21,83	15,34	9,35	6,00
	m _{F,D}	1,08	2,31	2,67	3,19	3,83	4,61	5,54	6,49	5,99	3,35	1,96
Fraktion 50-63	k _L	0,111	0,123	0,151	0,193	0,255	0,353	0,505	0,786	1,102	0,988	0,888
	m _{F,A}	36,44	36,04	35,16	34,11	32,82	31,19	29,06	26,27	22,45	18,01	14,78
	m _{F,D}	0,40	0,88	1,05	1,29	1,63	2,13	2,79	3,82	4,44	3,23	2,41
Fraktion >63	k _L	0,003	0,004	0,005	0,008	0,01	0,016	0,025	0,044	0,074	0,088	0,096
	m _{F,A}	14,07	14,07	14,06	14,05	14,03	14,00	13,96	13,89	13,77	13,57	13,33
	m _{F,D}	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,07	0,12	0,20	0,24	0,25

Abschnitt		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
L [m]		2,1-2,3	2,3-2,5	2,5-2,7	2,7-2,9	2,9-3,1	3,1-3,3	3,3-3,5	3,5-3,7	3,7-3,9	3,9-4,1	4,1
H [m]		0,036	0,031	0,028	0,026	0,024	0,022	0,021	0,020	0,018	0,018	0,017
$V_{<8-63}$		0,572	0,521	0,479	0,442	0,412	0,385	0,362	0,342	0,325	0,309	0,296
$V_{>63}$		0,428	0,479	0,521	0,558	0,588	0,615	0,638	0,658	0,675	0,691	0,704
ε		0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
Fraktion <8	k_L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$m_{F,A}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$m_{F,D}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fraktion 8-16	k_L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$m_{F,A}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$m_{F,D}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fraktion 16-22,4	k_L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$m_{F,A}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$m_{F,D}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fraktion 22,4-31,5	k_L	4,331	3,906	3,559	-	-	-	-	-	-	-	-
	$m_{F,A}$	0,05	0,02	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-
	$m_{F,D}$	0,03	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-
Fraktion 31,5-40	k_L	2,884	2,608	2,384	2,190	2,034	1,894	1,774	1,675	1,586	1,503	-
	$m_{F,A}$	1,01	0,57	0,34	0,21	0,14	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01
	$m_{F,D}$	0,44	0,23	0,13	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	-
Fraktion 40-50	k_L	1,790	1,619	1,489	1,371	1,271	1,188	1,111	1,048	0,997	0,945	-
	$m_{F,A}$	4,04	2,82	2,04	1,51	1,15	0,89	0,70	0,56	0,45	0,37	0,31
	$m_{F,D}$	1,22	0,78	0,53	0,36	0,26	0,19	0,14	0,11	0,08	0,06	-
Fraktion 50-63	k_L	0,805	0,730	0,670	0,618	0,573	0,537	0,507	0,475	0,450	0,433	-
	$m_{F,A}$	12,37	10,53	9,10	7,96	7,03	6,27	5,63	5,09	4,63	4,23	3,88
	$m_{F,D}$	1,84	1,43	1,14	0,93	0,76	0,64	0,54	0,46	0,40	0,35	-
Fraktion >63	k_L	0,109	0,118	0,123	0,130	0,137	0,138	0,144	0,148	0,149	0,154	-
	$m_{F,A}$	13,08	12,80	12,50	12,20	11,89	11,57	11,26	10,94	10,62	10,31	10,00
	$m_{F,D}$	0,28	0,30	0,30	0,31	0,32	0,31	0,32	0,32	0,31	0,31	-

Anhang IV: Berechnete Werte - Siebdeck 2

Korngröße	Abschnitt													
	1		2		3		4		5		6		7	
	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L
1	0,633	19,887	0,598	18,080	0,548	15,754	0,505	13,951	0,463	12,336	0,366	7,911	0,282	4,827
2	0,610	18,682	0,577	17,070	0,528	14,895	0,487	13,243	0,446	11,717	0,353	7,559	0,272	4,625
3	0,588	17,593	0,555	16,064	0,509	14,112	0,468	12,521	0,429	11,118	0,340	7,213	0,262	4,427
4	0,565	16,515	0,534	15,149	0,489	13,320	0,450	11,861	0,413	10,569	0,326	6,849	0,251	4,211
5	0,543	15,536	0,513	14,275	0,470	12,596	0,433	11,257	0,397	10,036	0,314	6,543	0,242	4,037
6	0,521	14,603	0,493	13,476	0,451	11,897	0,416	10,671	0,381	9,516	0,301	6,217	0,232	3,846
7	0,500	13,752	0,473	12,709	0,433	11,257	0,399	10,102	0,366	9,041	0,289	5,921	0,223	3,676
8	0,480	12,974	0,454	12,006	0,416	10,671	0,383	9,580	0,351	8,577	0,278	5,655	0,214	3,508
9	0,459	12,188	0,434	11,292	0,398	10,069	0,366	9,041	0,336	8,124	0,265	5,345	0,204	3,324
10	0,440	11,504	0,416	10,671	0,381	9,516	0,351	8,577	0,322	7,710	0,254	5,087	0,196	3,179
11	0,421	10,842	0,398	10,069	0,364	8,979	0,335	8,094	0,308	7,304	0,243	4,833	0,187	3,016
12	0,402	10,201	0,380	9,484	0,348	8,486	0,320	7,652	0,293	6,879	0,232	4,582	0,179	2,874
13	0,383	9,580	0,362	8,916	0,332	8,005	0,306	7,247	0,280	6,518	0,222	4,358	0,171	2,732
14	0,365	9,010	0,345	8,395	0,316	7,535	0,291	6,823	0,267	6,162	0,211	4,114	0,162	2,575
15	0,347	8,455	0,328	7,886	0,301	7,105	0,277	6,435	0,254	5,814	0,201	3,895	0,155	2,454
16	0,330	7,945	0,312	7,419	0,286	6,684	0,263	6,055	0,241	5,471	0,191	3,680	0,147	2,317
17	0,313	7,448	0,296	6,963	0,271	6,271	0,250	5,708	0,229	5,160	0,181	3,466	0,140	2,197
18	0,298	7,020	0,281	6,545	0,258	5,920	0,237	5,367	0,218	4,879	0,172	3,277	0,133	2,079
19	0,281	6,545	0,266	6,135	0,243	5,523	0,224	5,031	0,205	4,552	0,162	3,068	0,125	1,946
20	0,266	6,135	0,252	5,761	0,231	5,211	0,212	4,727	0,195	4,304	0,154	2,903	0,119	1,846
21	0,251	5,734	0,238	5,393	0,218	4,879	0,200	4,427	0,184	4,034	0,145	2,720	0,112	1,731
22	0,237	5,367	0,224	5,031	0,205	4,552	0,189	4,156	0,173	3,769	0,137	2,558	0,105	1,616
23	0,223	5,006	0,210	4,677	0,193	4,254	0,177	3,865	0,163	3,530	0,129	2,398	0,099	1,519
24	0,209	4,652	0,197	4,353	0,181	3,961	0,166	3,601	0,152	3,271	0,121	2,239	0,093	1,422
25	0,196	4,328	0,185	4,059	0,169	3,673	0,156	3,365	0,143	3,062	0,113	2,082	0,087	1,326
26	0,182	3,986	0,172	3,745	0,158	3,412	0,145	3,108	0,133	2,831	0,105	1,926	0,081	1,231
27	0,170	3,697	0,161	3,483	0,147	3,154	0,136	2,900	0,124	2,627	0,098	1,791	0,076	1,152
28	0,158	3,412	0,149	3,201	0,137	2,923	0,126	2,672	0,115	2,424	0,091	1,656	0,070	1,057
29	0,147	3,154	0,139	2,969	0,127	2,695	0,117	2,469	0,107	2,245	0,085	1,542	0,065	0,979
30	0,135	2,877	0,128	2,717	0,117	2,469	0,108	2,267	0,099	2,068	0,078	1,410	0,060	0,902
31	0,125	2,649	0,118	2,491	0,108	2,267	0,100	2,090	0,091	1,893	0,072	1,297	0,056	0,840
32	0,115	2,424	0,109	2,290	0,100	2,090	0,092	1,915	0,084	1,741	0,067	1,204	0,051	0,763
33	0,105	2,201	0,099	2,068	0,091	1,893	0,084	1,741	0,077	1,590	0,061	1,093	0,047	0,701
34	0,096	2,002	0,091	1,893	0,083	1,719	0,077	1,590	0,070	1,440	0,056	1,000	0,043	0,640
35	0,087	1,806	0,083	1,719	0,076	1,568	0,070	1,440	0,064	1,312	0,050	0,890	0,039	0,580
36	0,079	1,633	0,074	1,525	0,068	1,397	0,063	1,291	0,057	1,164	0,045	0,799	0,035	0,519
37	0,071	1,461	0,067	1,376	0,061	1,249	0,056	1,143	0,052	1,059	0,041	0,727	0,031	0,459
38	0,063	1,291	0,059	1,207	0,054	1,101	0,050	1,018	0,046	0,934	0,036	0,636	0,028	0,414
39	0,056	1,143	0,053	1,080	0,048	0,976	0,045	0,914	0,041	0,831	0,032	0,565	0,025	0,369
40	0,049	0,997	0,046	0,934	0,042	0,851	0,039	0,789	0,036	0,727	0,028	0,493	0,022	0,324

[illegible]

Korngröße	Abschnitt													
	8		9		10		11		12		13		14	
	W_{ges}	k_L	W_{ges}	k_L	W_{ges}	k_L	W_{ges}	k_L	W_{ges}	k_L	W_{ges}	k_L	W_{ges}	k_L
1	0,218	3,049	0,173	2,061	0,151	1,675	0,138	1,473	0,129	1,327	0,124	1,272	0,119	1,218
2	0,210	2,923	0,167	1,983	0,146	1,615	0,133	1,416	0,124	1,272	0,119	1,218	0,115	1,174
3	0,202	2,798	0,160	1,892	0,140	1,543	0,128	1,359	0,120	1,228	0,115	1,174	0,110	1,120
4	0,194	2,674	0,154	1,815	0,135	1,484	0,123	1,302	0,115	1,174	0,110	1,120	0,106	1,077
5	0,187	2,567	0,148	1,738	0,130	1,425	0,119	1,257	0,111	1,131	0,106	1,077	0,102	1,034
6	0,179	2,446	0,142	1,662	0,124	1,354	0,114	1,201	0,106	1,077	0,102	1,034	0,098	0,991
7	0,172	2,340	0,137	1,599	0,119	1,296	0,109	1,145	0,102	1,034	0,098	0,991	0,094	0,949
8	0,165	2,236	0,131	1,523	0,115	1,250	0,105	1,100	0,098	0,991	0,094	0,949	0,090	0,906
9	0,158	2,132	0,125	1,449	0,110	1,192	0,100	1,045	0,093	0,938	0,090	0,906	0,086	0,864
10	0,151	2,030	0,120	1,387	0,105	1,135	0,096	1,001	0,090	0,906	0,086	0,864	0,083	0,833
11	0,145	1,943	0,115	1,326	0,100	1,078	0,092	0,957	0,086	0,864	0,082	0,822	0,079	0,791
12	0,138	1,841	0,110	1,264	0,096	1,032	0,088	0,914	0,082	0,822	0,078	0,780	0,075	0,749
13	0,132	1,755	0,105	1,204	0,091	0,976	0,084	0,870	0,078	0,780	0,075	0,749	0,072	0,718
14	0,126	1,670	0,100	1,143	0,087	0,931	0,080	0,827	0,074	0,739	0,071	0,708	0,069	0,687
15	0,120	1,585	0,095	1,083	0,083	0,886	0,076	0,784	0,071	0,708	0,068	0,677	0,065	0,646
16	0,114	1,501	0,090	1,023	0,079	0,842	0,072	0,741	0,067	0,666	0,064	0,636	0,062	0,615
17	0,108	1,417	0,086	0,976	0,075	0,798	0,068	0,699	0,064	0,636	0,061	0,605	0,059	0,584
18	0,102	1,334	0,081	0,916	0,071	0,753	0,065	0,667	0,061	0,605	0,058	0,574	0,056	0,554
19	0,097	1,265	0,077	0,869	0,067	0,709	0,061	0,624	0,057	0,564	0,055	0,544	0,053	0,523
20	0,092	1,197	0,073	0,822	0,064	0,677	0,058	0,593	0,054	0,533	0,052	0,513	0,050	0,493
21	0,086	1,115	0,069	0,776	0,060	0,633	0,055	0,561	0,051	0,503	0,049	0,483	0,047	0,463
22	0,081	1,047	0,065	0,729	0,056	0,590	0,052	0,530	0,048	0,473	0,046	0,453	0,044	0,432
23	0,077	0,994	0,061	0,683	0,053	0,557	0,049	0,498	0,045	0,442	0,043	0,422	0,042	0,412
24	0,072	0,927	0,057	0,637	0,050	0,525	0,046	0,467	0,042	0,412	0,041	0,402	0,039	0,382
25	0,067	0,860	0,053	0,591	0,047	0,492	0,043	0,436	0,040	0,392	0,038	0,372	0,037	0,362
26	0,063	0,807	0,050	0,557	0,044	0,460	0,040	0,405	0,037	0,362	0,036	0,352	0,034	0,332
27	0,059	0,754	0,046	0,511	0,041	0,428	0,037	0,374	0,035	0,342	0,033	0,322	0,032	0,313
28	0,054	0,688	0,043	0,477	0,038	0,396	0,035	0,353	0,032	0,313	0,031	0,303	0,030	0,293
29	0,050	0,636	0,040	0,443	0,035	0,364	0,032	0,323	0,030	0,293	0,029	0,283	0,028	0,273
30	0,047	0,597	0,037	0,409	0,032	0,333	0,030	0,302	0,028	0,273	0,026	0,253	0,025	0,243
31	0,043	0,545	0,034	0,375	0,030	0,312	0,027	0,272	0,025	0,243	0,024	0,233	0,023	0,224
32	0,040	0,506	0,031	0,342	0,027	0,280	0,025	0,251	0,023	0,224	0,022	0,214	0,022	0,214
33	0,036	0,455	0,029	0,319	0,025	0,259	0,023	0,231	0,021	0,204	0,020	0,194	0,020	0,194
34	0,033	0,416	0,026	0,286	0,023	0,238	0,021	0,211	0,020	0,194	0,019	0,184	0,018	0,175
35	0,030	0,378	0,024	0,264	0,021	0,217	0,019	0,190	0,018	0,175	0,017	0,165	0,016	0,155
36	0,027	0,339	0,021	0,230	0,019	0,196	0,017	0,170	0,016	0,155	0,015	0,145	0,015	0,145
37	0,024	0,301	0,019	0,208	0,017	0,175	0,015	0,150	0,014	0,135	0,014	0,135	0,013	0,126
38	0,022	0,276	0,017	0,186	0,015	0,155	0,014	0,140	0,013	0,126	0,012	0,116	0,012	0,116
39	0,019	0,238	0,015	0,164	0,013	0,134	0,012	0,120	0,011	0,106	0,011	0,106	0,010	0,097
40	0,017	0,213	0,013	0,142	0,012	0,124	0,011	0,110	0,010	0,097	0,010	0,097	0,009	0,087

[illegible]

Korngröße	Abschnitt											
	15		16		17		18		19		20	
	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L
1	0,115	1,174	0,111	1,131	0,109	1,109	0,107	1,123	0,105	1,100	0,103	1,078
2	0,111	1,131	0,107	1,088	0,105	1,066	0,103	1,078	0,101	1,056	0,099	1,034
3	0,106	1,077	0,103	1,045	0,101	1,023	0,099	1,034	0,098	1,023	0,095	0,990
4	0,102	1,034	0,099	1,002	0,097	0,981	0,096	1,001	0,094	0,979	0,092	0,957
5	0,098	0,991	0,095	0,959	0,093	0,938	0,092	0,957	0,090	0,936	0,088	0,914
6	0,094	0,949	0,092	0,927	0,090	0,906	0,088	0,914	0,087	0,903	0,084	0,870
7	0,091	0,917	0,088	0,885	0,086	0,864	0,085	0,881	0,083	0,860	0,081	0,838
8	0,087	0,875	0,084	0,843	0,083	0,833	0,081	0,838	0,080	0,827	0,078	0,806
9	0,083	0,833	0,081	0,812	0,079	0,791	0,078	0,806	0,076	0,784	0,074	0,763
10	0,080	0,801	0,077	0,770	0,076	0,760	0,074	0,763	0,073	0,752	0,071	0,731
11	0,076	0,760	0,074	0,739	0,072	0,718	0,071	0,731	0,070	0,720	0,068	0,699
12	0,073	0,728	0,071	0,708	0,069	0,687	0,068	0,699	0,067	0,688	0,065	0,667
13	0,069	0,687	0,067	0,666	0,066	0,656	0,065	0,667	0,064	0,656	0,062	0,635
14	0,066	0,656	0,064	0,636	0,063	0,625	0,062	0,635	0,061	0,624	0,059	0,603
15	0,063	0,625	0,061	0,605	0,060	0,595	0,059	0,603	0,058	0,593	0,056	0,572
16	0,060	0,595	0,058	0,574	0,057	0,564	0,056	0,572	0,055	0,561	0,053	0,540
17	0,057	0,564	0,055	0,544	0,054	0,533	0,053	0,540	0,052	0,530	0,051	0,519
18	0,054	0,533	0,052	0,513	0,051	0,503	0,050	0,509	0,049	0,498	0,048	0,488
19	0,051	0,503	0,049	0,483	0,048	0,473	0,048	0,488	0,047	0,478	0,046	0,467
20	0,048	0,473	0,047	0,463	0,046	0,453	0,045	0,457	0,044	0,446	0,043	0,436
21	0,046	0,453	0,044	0,432	0,043	0,422	0,043	0,436	0,042	0,426	0,041	0,415
22	0,043	0,422	0,042	0,412	0,041	0,402	0,040	0,405	0,039	0,395	0,038	0,384
23	0,040	0,392	0,039	0,382	0,038	0,372	0,038	0,384	0,037	0,374	0,036	0,364
24	0,038	0,372	0,037	0,362	0,036	0,352	0,035	0,353	0,035	0,353	0,034	0,343
25	0,035	0,342	0,034	0,332	0,034	0,332	0,033	0,333	0,032	0,323	0,032	0,323
26	0,033	0,322	0,032	0,313	0,031	0,303	0,031	0,312	0,030	0,302	0,030	0,302
27	0,031	0,303	0,030	0,293	0,029	0,283	0,029	0,292	0,028	0,282	0,028	0,282
28	0,029	0,283	0,028	0,273	0,027	0,263	0,027	0,272	0,026	0,261	0,026	0,261
29	0,027	0,263	0,026	0,253	0,025	0,243	0,025	0,251	0,024	0,241	0,024	0,241
30	0,025	0,243	0,024	0,233	0,023	0,224	0,023	0,231	0,022	0,221	0,022	0,221
31	0,023	0,224	0,022	0,214	0,021	0,204	0,021	0,211	0,021	0,211	0,020	0,200
32	0,021	0,204	0,020	0,194	0,020	0,194	0,019	0,190	0,019	0,190	0,019	0,190
33	0,019	0,184	0,018	0,175	0,018	0,175	0,018	0,180	0,017	0,170	0,017	0,170
34	0,017	0,165	0,017	0,165	0,017	0,165	0,016	0,160	0,016	0,160	0,016	0,160
35	0,016	0,155	0,015	0,145	0,015	0,145	0,015	0,150	0,015	0,150	0,014	0,140
36	0,014	0,135	0,014	0,135	0,014	0,135	0,013	0,130	0,013	0,130	0,013	0,130
37	0,013	0,126	0,012	0,116	0,012	0,116	0,012	0,120	0,012	0,120	0,011	0,110
38	0,011	0,106	0,011	0,106	0,011	0,106	0,011	0,110	0,010	0,100	0,010	0,100
39	0,010	0,097	0,010	0,097	0,010	0,097	0,009	0,090	0,009	0,090	0,009	0,090
40	0,009	0,087	0,009	0,087	0,008	0,077	0,008	0,080	0,008	0,080	0,008	0,080

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Anhang V: Berechnete Werte - Siebdeck 3

Korngröße	Abschnitt													
	1		2		3		4		5		6		7	
	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L
1	0,618	19,391	0,585	17,721	0,533	15,343	0,480	13,177	0,427	11,221	0,372	9,374	0,314	7,360
2	0,582	17,576	0,551	16,135	0,501	14,007	0,452	12,120	0,402	10,360	0,350	8,680	0,295	6,827
3	0,547	15,956	0,518	14,706	0,472	12,869	0,425	11,151	0,378	9,568	0,329	8,040	0,278	6,362
4	0,514	14,539	0,487	13,450	0,443	11,792	0,399	10,260	0,355	8,836	0,309	7,448	0,261	5,907
5	0,481	13,215	0,456	12,267	0,415	10,803	0,374	9,438	0,333	8,160	0,290	6,901	0,244	5,463
6	0,450	12,046	0,426	11,186	0,388	9,894	0,349	8,649	0,311	7,506	0,271	6,369	0,228	5,054
7	0,419	10,942	0,397	10,193	0,361	9,024	0,326	7,950	0,290	6,901	0,252	5,851	0,213	4,678
8	0,389	9,927	0,369	9,278	0,336	8,251	0,303	7,274	0,269	6,314	0,234	5,371	0,198	4,309
9	0,361	9,024	0,342	8,434	0,312	7,535	0,281	6,647	0,250	5,797	0,217	4,929	0,183	3,947
10	0,334	8,190	0,316	7,653	0,288	6,844	0,259	6,040	0,230	5,266	0,201	4,522	0,169	3,616
11	0,307	7,390	0,291	6,930	0,265	6,204	0,239	5,503	0,213	4,826	0,185	4,122	0,156	3,312
12	0,282	6,675	0,268	6,286	0,244	5,636	0,219	4,981	0,195	4,371	0,170	3,755	0,143	3,014
13	0,258	6,013	0,245	5,663	0,223	5,084	0,201	4,522	0,178	3,950	0,155	3,394	0,131	2,742
14	0,236	5,424	0,224	5,110	0,203	4,572	0,183	4,073	0,163	3,585	0,142	3,086	0,120	2,497
15	0,214	4,852	0,202	4,547	0,184	4,097	0,166	3,658	0,148	3,227	0,129	2,783	0,108	2,232
16	0,193	4,321	0,183	4,073	0,167	3,682	0,150	3,275	0,134	2,899	0,116	2,484	0,098	2,014
17	0,173	3,828	0,164	3,609	0,149	3,251	0,134	2,899	0,119	2,553	0,104	2,213	0,088	1,799
18	0,154	3,370	0,146	3,180	0,133	2,876	0,120	2,576	0,107	2,280	0,093	1,967	0,078	1,586
19	0,137	2,969	0,129	2,783	0,118	2,530	0,106	2,258	0,094	1,989	0,082	1,724	0,069	1,396
20	0,120	2,576	0,114	2,439	0,103	2,190	0,093	1,967	0,083	1,746	0,072	1,506	0,061	1,229
21	0,105	2,235	0,099	2,101	0,091	1,923	0,082	1,724	0,073	1,527	0,063	1,311	0,053	1,064
22	0,090	1,900	0,085	1,790	0,078	1,636	0,070	1,462	0,062	1,290	0,054	1,119	0,046	0,920
23	0,077	1,615	0,073	1,527	0,066	1,376	0,060	1,247	0,053	1,097	0,046	0,949	0,039	0,777
24	0,065	1,354	0,062	1,290	0,056	1,161	0,051	1,055	0,045	0,928	0,039	0,802	0,033	0,655
25	0,054	1,119	0,051	1,055	0,046	0,949	0,042	0,865	0,037	0,760	0,032	0,655	0,027	0,535
26	0,044	0,907	0,041	0,844	0,038	0,781	0,034	0,697	0,030	0,614	0,026	0,531	0,022	0,434
27	0,034	0,697	0,033	0,676	0,030	0,614	0,027	0,552	0,024	0,489	0,021	0,428	0,017	0,335
28	0,026	0,531	0,025	0,510	0,022	0,448	0,020	0,407	0,018	0,366	0,016	0,325	0,013	0,256
29	0,020	0,407	0,018	0,366	0,017	0,345	0,015	0,305	0,013	0,264	0,012	0,243	0,010	0,196
30	0,013	0,264	0,012	0,243	0,011	0,223	0,010	0,203	0,009	0,182	0,008	0,162	0,007	0,137
31	0,008	0,162	0,008	0,162	0,007	0,142	0,006	0,121	0,006	0,121	0,005	0,101	0,004	0,078
32	0,005	0,101	0,004	0,081	0,004	0,081	0,004	0,081	0,003	0,061	0,003	0,061	0,002	0,039
33	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020
34	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,001	0,020	0,000	0,000
35	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
36	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
37	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
38	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
39	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Korngröße	Abschnitt													
	8		9		10		11		12		13		14	
	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L	W _{ges}	k _L
1	0,268	5,899	0,240	5,190	0,212	4,432	0,191	3,811	0,170	3,177	0,157	2,859	0,146	2,593
2	0,252	5,491	0,226	4,844	0,199	4,127	0,180	3,568	0,160	2,973	0,148	2,681	0,138	2,440
3	0,237	5,115	0,212	4,505	0,188	3,874	0,169	3,329	0,151	2,791	0,139	2,505	0,129	2,269
4	0,223	4,771	0,199	4,196	0,176	3,601	0,159	3,113	0,142	2,611	0,131	2,350	0,122	2,138
5	0,209	4,434	0,187	3,915	0,165	3,354	0,149	2,901	0,133	2,433	0,123	2,197	0,114	1,989
6	0,195	4,102	0,174	3,615	0,154	3,111	0,139	2,691	0,124	2,257	0,115	2,045	0,106	1,841
7	0,182	3,799	0,163	3,365	0,144	2,892	0,130	2,504	0,116	2,102	0,107	1,894	0,099	1,713
8	0,169	3,501	0,151	3,095	0,134	2,676	0,120	2,298	0,107	1,930	0,099	1,745	0,092	1,586
9	0,157	3,230	0,140	2,852	0,124	2,462	0,112	2,136	0,100	1,796	0,092	1,616	0,085	1,459
10	0,145	2,962	0,129	2,612	0,114	2,251	0,103	1,954	0,092	1,646	0,085	1,487	0,079	1,352
11	0,133	2,699	0,119	2,396	0,105	2,063	0,095	1,795	0,085	1,515	0,078	1,359	0,073	1,245
12	0,123	2,482	0,110	2,204	0,097	1,898	0,087	1,637	0,078	1,385	0,072	1,251	0,067	1,139
13	0,112	2,246	0,100	1,992	0,089	1,734	0,080	1,499	0,071	1,256	0,066	1,143	0,061	1,034
14	0,102	2,034	0,092	1,825	0,081	1,571	0,073	1,363	0,065	1,146	0,060	1,036	0,056	0,947
15	0,093	1,846	0,083	1,639	0,073	1,410	0,066	1,228	0,059	1,037	0,054	0,929	0,051	0,860
16	0,084	1,659	0,075	1,474	0,066	1,270	0,060	1,113	0,053	0,928	0,049	0,841	0,046	0,774
17	0,075	1,474	0,067	1,311	0,059	1,131	0,053	0,979	0,048	0,839	0,044	0,753	0,041	0,688
18	0,067	1,311	0,060	1,170	0,053	1,013	0,048	0,884	0,043	0,749	0,039	0,666	0,036	0,602
19	0,059	1,150	0,053	1,030	0,047	0,895	0,042	0,771	0,038	0,661	0,035	0,596	0,032	0,534
20	0,052	1,010	0,046	0,891	0,041	0,779	0,037	0,678	0,033	0,572	0,031	0,527	0,028	0,467
21	0,046	0,891	0,041	0,792	0,036	0,682	0,032	0,585	0,029	0,502	0,027	0,458	0,025	0,416
22	0,039	0,752	0,035	0,674	0,031	0,586	0,028	0,511	0,025	0,432	0,023	0,390	0,021	0,349
23	0,033	0,635	0,030	0,576	0,026	0,490	0,024	0,437	0,021	0,362	0,020	0,338	0,018	0,298
24	0,028	0,537	0,025	0,479	0,022	0,414	0,020	0,363	0,018	0,310	0,017	0,287	0,015	0,248
25	0,023	0,440	0,021	0,401	0,018	0,338	0,017	0,308	0,015	0,258	0,014	0,236	0,013	0,215
26	0,019	0,363	0,017	0,324	0,015	0,281	0,013	0,235	0,012	0,206	0,011	0,185	0,010	0,165
27	0,015	0,286	0,013	0,247	0,012	0,225	0,011	0,199	0,009	0,154	0,009	0,151	0,008	0,132
28	0,011	0,209	0,010	0,190	0,009	0,168	0,008	0,144	0,007	0,120	0,007	0,118	0,006	0,099
29	0,008	0,152	0,008	0,152	0,007	0,131	0,006	0,108	0,005	0,085	0,005	0,084	0,005	0,082
30	0,006	0,114	0,005	0,095	0,004	0,075	0,004	0,072	0,004	0,068	0,003	0,050	0,003	0,049
31	0,004	0,076	0,003	0,057	0,003	0,056	0,003	0,054	0,002	0,034	0,002	0,034	0,002	0,033
32	0,002	0,038	0,002	0,038	0,002	0,037	0,001	0,018	0,001	0,017	0,001	0,017	0,001	0,016
33	0,001	0,019	0,001	0,019	0,001	0,019	0,001	0,018	0,001	0,017	0,001	0,017	0,001	0,016
34	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
35	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
36	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
37	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
38	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
39	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

[illegible]

[illegible]

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Engerwitzdorf, den 24.Juli 2012

Andreas Hackner